



TUGAS AKHIR (AE43250)

**OPTIMASI SISTEM ELEKTROLISIS HHO GENERATOR
MENGUNAKAN KONTROL PID UNTUK MENINGKATKAN
EFISIENSI PRODUKSI HIDROGEN**

Maulana Syarif Hidayatullah
NRP. 0921040022

Dosen Pembimbing :
Lilik Subiyanto, S.T., M.T.
Dr. Eng. Muhammad Anis Mustaghfirin, ST., MT.

PROGRAM STUDI D4 TEKNIK OTOMASI
JURUSAN TEKNIK KELISTRIKAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2025

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

TUGAS AKHIR (AE43250)

**OPTIMASI SISTEM ELEKTROLISIS HHO GENERATOR
MENGUNAKAN KONTROL PID UNTUK MENINGKATKAN
EFISIENSI PRODUKSI HIDROGEN**

Maulana Syarif Hidayatullah
NRP. 0921040022

Dosen Pembimbing :
Lilik Subiyanto, S.T., M.T.
Dr. Eng. Muhammad Anis Mustaghfirin, ST., MT.

PROGRAM STUDI D4 TEKNIK OTOMASI
JURUSAN TEKNIK KELISTRIKAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2025

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**OPTIMASI SISTEM ELEKTROLISIS HHO GENERATOR
MENGUNAKAN KONTROL PID UNTUK MENINGKATKAN
EFISIENSI PRODUKSI HIDROGEN**

**Disusun Oleh:
Maulana Syarif Hidayatullah
0921040022**

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Kelulusan
Program Studi D4 Teknik Otomasi
Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA**

**Disetujui oleh Tim penguji Tugas Akhir Tanggal Ujian : 17 Juli 2025
Periode Wisuda : Oktober 2025**

Menyetujui,

Dosen Penguji

1. Ii Munadhif, S.ST., M.T.
2. Lilik Subiyanto, S.T., M.T.
3. Aulia Rahma Annisa, S.ST., M.T.
4. Mustika Kurnia M., S.Kom., M.Tr.Kom.

NUPTK

(7042769670130383)
(4462747648130072)
(4935769670230302)
(0835774675230272)

Tanda Tangan

(.....)
(.....)
(.....)
(.....)

Dosen Pembimbing

1. Lilik Subiyanto, S.T., M.T.
2. Dr. Eng. Muhammad Anis M., ST., MT.

NUPTK

(4462747648130072)
(0137750651130173)

Tanda Tangan

(.....)
(.....)

Menyetujui

Ketua Jurusan,

**Isa Rachman, S.T., M.T.
NIP.198008162008121001**

Mengetahui

Koordinator Program Studi,

**Agus Khumaidi, S.ST., M.T.
NIP. 199308172020121004**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

| | | |
|---|---|--|
|  | <p align="center">PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT</p> | <p>No. : F.WD I. 021 Date : 3 Nopember 2015 Rev. : 01 Page : 1 dari 1</p> |
|---|---|--|

Yang bertandatangan dibawah ini :

Nama : Maulana Syarif Hidayatullah

Nrp. : 0921040022

Jurusan/Prodi : Teknik Kelistrikan Kapal/Teknik Otomasi

Dengan ini saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa :

Tugas Akhir yang akan saya kerjakan dengan judul :

**OPTIMASI SISTEM ELEKTROLISIS HHO GENERATOR
MENGUNAKAN KONTROL PID UNTUK MENINGKATKAN
EFISIENSI PRODUKSI HIDROGEN**

Apabila benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain.

Apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam karya ilmiah tersebut,
maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan peraturan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh tanggung jawab.

Surabaya, 17 Juli 2025

Yang membuat pernyataan,



(Maulana Syarif Hidayatullah)

Nrp. 0921040022

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, Puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “OPTIMASI SISTEM ELEKTROLISIS HHO GENERATOR MENGGUNAKAN KONTROL PID UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI PRODUKSI HIDROGEN” sebagai salah satu syarat untuk meraih gelar Diploma 4 pada program Studi Teknik Otomasi di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Dengan segala kerendahan hati, penulis menyadari bahwa dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini tidak lepas dari peran berbagai pihak yang telah banyak memberikan bantuan dan dukungan dari segi motivasi, moral, materi, serta semangat yang tiada hentinya. Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih yang tak terhingga kepada.

1. Ibu Wiwik, Bapak Abdullah Sani, dan seluruh keluarga yang tiada hentinya terus mendoakan, memberikan semangat dan motivasi untuk terus berusaha serta mendukung segala usaha yang telah dilakukan oleh penulis semasa kuliah hingga penyusunan Tugas Akhir.
2. Bapak Isa Rachman, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
3. Bapak Agus Khumaidi, S.ST., M.T. selaku Koordinator Program Studi Teknik Otomasi Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
4. Bapak Ryan Yudha Adhitya, S.ST., M.T. selaku Koordinator Tugas Akhir Teknik Otomasi yang telah memberikan arahan, dukungan, dan motivasi dalam mengerjakan Tugas Akhir ini.
5. Bapak Lilik Subiyanto, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing I yang selalu memberikan waktunya untuk membimbing saya dengan sabar sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
6. Bapak Dr. Eng. M. Anis Mustaghfirin, ST., MT. selaku Dosen Pembimbing II yang telah mengarahkan, memberi koreksi, memberi solusi serta dukungan penuh dalam penyusunan Tugas Akhir ini dengan baik.
7. Bapak Ii Munadhif, S.ST., M.T., Ibu Aulia Rahma Annisa, S.ST., M.T., dan Ibu Mustika Kurnia Mayangsari S.Kom., M.Tr.Kom. selaku Dosen penguji

yang telah meluangkan waktu serta memberikan masukan, saran, dan kritik yang membantu saya untuk memperbaiki dan memahami materi dengan baik.

8. Seluruh Jajaran Dosen Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal PPNS yang telah memberikan ilmu dan bimbingannya selama penulis menjalankan studi.
9. Seluruh teman-teman Teknik Otomasi 2021 atas 4 tahun yang sangat berkesan sehingga dapat dijadikan pengalaman berharga selama hidup.
10. Semua pihak yang telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan Tugas Akhir ini.

Penulis sepenuhnya menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk perbaikan di masa depan. Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi semua orang yang membacanya. Akhir kata, semoga Tugas Akhir ini bisa menjadi amal baik yang bermanfaat bagi penulis dan bagi siapa pun yang membacanya.

Penulis

(Maulana Syarif Hidayatullah)

Optimasi Sistem Elektrolisis HHO Generator Menggunakan Kontrol PID untuk Meningkatkan Efisiensi Produksi Hidrogen

Maulana Syarif Hidayatullah

ABSTRAK

Penelitian ini mengembangkan sistem kontrol PD untuk mengoptimalkan produksi hidrogen melalui elektrolisis berbasis tabung elektrolizer dengan parameter P-D yang ditentukan menggunakan metode Ziegler-Nichols. Nilai $K_p = 42.52353$ dan $K_d = 24.323$ diperoleh, sehingga sistem mampu merespons perubahan suhu secara *real-time* dan menjaga kestabilan suhu lebih terjaga dibandingkan tanpa kontrol. Penggunaan kontrol PD meningkatkan produksi hidrogen secara signifikan dengan meningkatkan konsistensi dan efisiensi menghasilkan gas hidrogen. Prototipenya mampu bekerja secara otomatis dan terintegrasi, dilengkapi dengan sensor suhu (PT100), sensor tegangan, sensor arus, sensor gas (MiCS-5524), serta sistem aktuasi berbasis PWM. Hasilnya menunjukkan bahwa sistem bekerja stabil dan efisien selama proses elektrolisis berlangsung. Efisiensi waktu produksi meningkat secara signifikan dengan adanya kontrol PD, sebagaimana ditunjukkan oleh perbandingan antara waktu produksi sebelum dan sesudah optimasi. Sistem dengan kontrol PD mampu mempercepat pencapaian volume hidrogen yang sama dalam waktu yang lebih singkat dengan efisiensi sebesar 25%. Penelitian ini menunjukkan bahwa kontrol PD menghasilkan konsistensi proses elektrolisis, mengurangi pemborosan energi, dan meningkatkan efisiensi sistem energi hidrogen secara keseluruhan.

Kata kunci: Elektrolisis, HHO Generator, dan PID (*Proportional-Integral-Derivative*)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Optimization of HHO Generator Electrolysis System Using PID Control to Improve Hydrogen Production Efficiency
Maulana Syarif Hidayatullah

ABSTRACT

This study developed a PD control system to optimize hydrogen production through electrolysis based on electrolyzer tubes with P-D parameters determined using the Ziegler-Nichols method. The $K_p = 42.52353$ and $K_d = 24.323$ were obtained, allowing the system to respond to real-time temperature changes and maintain temperature stability more effectively than without control. PD control improved hydrogen production significantly by increasing the consistency and efficiency of producing hydrogen gas. The prototype is capable of working automatically and is integrated, equipped with a temperature sensor (PT100), a voltage sensor, a current sensor, a gas sensor (MiCS-5524), and a PWM-based actuation system. The results indicate that the system operates stably and efficiently throughout the electrolysis process. The efficiency of production time is significantly improved by the PD control, as demonstrated by the comparison between production time before and after optimization. The system with PD control was able to achieve the same volume of hydrogen in a shorter time with an efficiency of 25%. This research shows that PD control brings consistency to the electrolysis process, reduces energy waste, and improves the overall efficiency of the hydrogen energy system.

Keywords: *Electrolysis, HHO Generator, and PID (Proportional-Integral-Derivative).*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

| | |
|--|----------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| LEMBAR PENGESAHAN | iii |
| PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT | v |
| KATA PENGANTAR..... | vii |
| ABSTRAK | ix |
| <i>ABSTRACT</i> | xi |
| DAFTAR ISI..... | xiii |
| DAFTAR TABEL | xvii |
| DAFTAR GAMBAR..... | xix |
| DAFTAR NOTASI..... | xxi |
| BAB 1 PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 3 |
| 1.3 Batasan Penelitian | 3 |
| 1.4 Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.5 Manfaat Penelitian | 4 |
| BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA..... | 5 |
| 2.1 Kajian Penelitian Terdahulu..... | 5 |
| 2.2 Kajian Pustaka..... | 7 |
| 2.2.1 <i>Proportional, Integral, Derivative</i> (PID)..... | 8 |
| 2.2.2 <i>Pulse Width Modulation</i> (PWM) | 9 |
| 2.2.3 Hidrogen Generator..... | 9 |
| 2.3 <i>Hardware</i> yang digunakan..... | 14 |
| 2.2.4 ESP32..... | 14 |

| | |
|--|-----------|
| 2.2.5 <i>Power Supply</i> | 15 |
| 2.2.6 LM2596..... | 16 |
| 2.2.7 <i>Voltage Sensor</i> | 16 |
| 2.2.8 <i>Current Sensor</i> (ACS712) | 17 |
| 2.2.9 Sensor Gas Hidrogen MICS-5524..... | 18 |
| 2.2.10 <i>Temperature Sensor</i> (RTD PT100) | 19 |
| 2.2.11 Modul MAX31865 | 20 |
| 2.2.12 Modul LCD | 20 |
| 2.2.13 <i>Driver</i> BTS7960 | 21 |
| 2.2.14 DC <i>Fan/Blower</i> | 22 |
| 2.2.15 Relay..... | 23 |
| 2.2.16 <i>Push Button</i> | 23 |
| 2.2.17 Modul RTC (<i>Real Time Clock</i>) | 24 |
| 2.2.18 Arduino Ide..... | 24 |
| 2.2.19 Matlab..... | 25 |
| BAB 3 METODE PENELITIAN | 27 |
| 3.1 Tahapan Penelitian | 27 |
| 3.1.1 Identifikasi Masalah | 28 |
| 3.1.2 Studi Literatur..... | 28 |
| 3.1.3 Analisa Kebutuhan Sistem | 28 |
| 3.2 Konsep Penelitian..... | 29 |
| 3.2.1 Prinsip Kerja Sistem..... | 30 |
| 3.3 Perencanaan dan Desain | 34 |
| 3.3.1 Perancangan <i>software</i> | 34 |
| 3.3.2 Perancangan <i>Hardware</i> | 36 |
| 3.3.3 Perancangan <i>Hardware</i> Prototipe | 38 |

| | |
|--|-----------|
| BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN..... | 39 |
| 4.1 Hasil Perancangan <i>Hardware</i> | 39 |
| 4.1.1 Perancangan <i>Hardware</i> Mikrokontroller ESP32 | 39 |
| 4.1.2 Hasil Perancangan Panel..... | 40 |
| 4.1.3 Hasil Perancangan Mekanik..... | 41 |
| 4.2 Hasil Pengujian Sensor dan Aktuator | 43 |
| 4.2.1 Hasil Perancangan Sensor MICS-5524..... | 43 |
| 4.2.2 Hasil Perancangan Sensor Temperature PT100..... | 45 |
| 4.2.3 Hasil Perancangan Sensor Arus | 47 |
| 4.2.4 Hasil Perancangan Sensor Tegangan | 49 |
| 4.2.5 Hasil Perancangan <i>Hardware</i> Relay dan DC <i>Fan</i> | 51 |
| 4.2.6 Hasil Perancangan <i>Driver</i> BTS7960..... | 51 |
| 4.3 Pengujian HHO Generator | 53 |
| 4.4 Pengujian Metode PID | 56 |
| 4.4.1 Pemodelan Transfer Function | 56 |
| 4.4.2 Penentuan Konstanta PID ZN 1 | 61 |
| 4.4.3 Simulasi Tuning Manual Dengan Metode PID <i>Ziegler-Nichols</i> 1..... | 63 |
| 4.5 Pengujian Keseluruhan Sistem..... | 68 |
| 4.5.1 Kontrol Manual..... | 68 |
| 4.5.2 Kontrol Otomatis | 69 |
| 4.5.3 Pengujian Tanpa Metode (Manual) | 69 |
| 4.5.4 Pengujian Menggunakan Metode (Auto)..... | 72 |
| 4.6 Hasil Perbandingan Produksi Gas..... | 80 |
| 4.7 Efisiensi Waktu Hasil Produksi Gas | 82 |
| BAB 5..... | 85 |
| 5.1 Kesimpulan | 85 |

| | |
|-----------------------------|-----------|
| 5.2 Saran.. | 86 |
| DAFTAR PUSTAKA | 87 |
| LAMPIRAN | 91 |

DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu | 5 |
| Tabel 2. 2 Tabel Hasil Percobaan Katalis KOH | 12 |
| Tabel 2. 3 Spesifikasi ESP32 | 15 |
| Tabel 2. 4 Kebutuhan Sistem | 28 |
| Tabel 4. 1 Hasil Percobaan Sensor MICS-5524 | 44 |
| Tabel 4. 2 Pengujian sensor suhu PT100 dengan termometer | 46 |
| Tabel 4. 3 Pengujian Sensor Arus | 48 |
| Tabel 4. 4 Pengujian Sensor Tegangan | 50 |
| Tabel 4. 5 Referensi Ziegler Nichols 1 | 62 |
| Tabel 4. 6 Tabel Data Pengujian Mode Manual | 69 |
| Tabel 4. 7 Tabel Data Pengujian Parameter P | 74 |
| Tabel 4. 8 Tabel Data Pengujian Parameter PI | 76 |
| Tabel 4. 9 Tabel Data Pengujian Parameter PD | 78 |
| Tabel 4. 10 Tabel Data Pengujian Parameter PID | 79 |
| Tabel 4. 11 Perbandingan Hasil Produksi Gas | 81 |
| Tabel 4. 12 Tabel Hasil Pengujian | 82 |

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 2. 1 Dry Cell Hidrogen Generator | 11 |
| Gambar 2. 2 Wet Cell Hidrgoen Generator | 11 |
| Gambar 2. 3 ESP32 | 15 |
| Gambar 2. 4 <i>Power Supply</i> | 16 |
| Gambar 2. 5 LM2596..... | 16 |
| Gambar 2. 6 <i>Voltage</i> Sensor..... | 17 |
| Gambar 2. 7 <i>Current</i> Sensor ACS712 | 18 |
| Gambar 2. 8 Sensor MICS-5524..... | 18 |
| Gambar 2. 9 Temperature Sensor (PT100) | 19 |
| Gambar 2. 10 Hubungan Waktu Tegangan dan Temperatur | 19 |
| Gambar 2. 11 Modul MAX31865 | 20 |
| Gambar 2. 12 LCD..... | 21 |
| Gambar 2. 13 <i>Driver</i> BTS7960..... | 22 |
| Gambar 2. 14 Turbo Mini <i>Fan</i> | 23 |
| Gambar 2. 15 Relay..... | 23 |
| Gambar 2. 16 <i>Push Button</i> | 24 |
| Gambar 2. 17 Modul RTC | 24 |
| Gambar 2. 18 Arduino Ide | 25 |
| Gambar 2. 19 Matlab..... | 26 |
| Gambar 3. 1 Tahapan Penelitian | 27 |
| Gambar 3. 2 Rancangan Diagram Blok Konsep Penelitian | 29 |
| Gambar 3. 3 Rancangan Diagram Blok Sistem | 30 |
| Gambar 3. 4 Rancangan Alur Kerja Sistem 1 | 32 |
| Gambar 3. 5 Rancangan Alur Kerja Sistem 2 | 33 |
| Gambar 3. 6 Perancangan <i>Hardware</i> | 37 |
| Gambar 3. 7 Perancangan <i>Hardware</i> Prototipe | 38 |
| Gambar 4. 1 Desain <i>Board</i> PCB | 40 |
| Gambar 4. 2 Hasil Cetak <i>Board</i> PCB..... | 40 |
| Gambar 4. 3 Panel Tampak Luar | 41 |
| Gambar 4. 4 Panel Tampak Dalam | 41 |
| Gambar 4. 5 Meja Penelitian..... | 42 |

| | |
|--|----|
| Gambar 4. 6 Tabung Elektrolizer dan Tabung Filter | 42 |
| Gambar 4. 7 Tahap Perancangan Mekanik..... | 43 |
| Gambar 4. 8 <i>Wiring</i> MICS-5524 | 44 |
| Gambar 4. 9 Pengujian Sensor Gas MICS-5524 | 45 |
| Gambar 4. 10 <i>Wiring</i> MAX31865 dan PT100 | 46 |
| Gambar 4. 11 Pengujian sensor PT100 | 47 |
| Gambar 4. 12 <i>Wiring</i> sensor arus | 48 |
| Gambar 4. 13 Pengujian Sensor Arus..... | 49 |
| Gambar 4. 14 <i>Wiring</i> sensor tegangan..... | 50 |
| Gambar 4. 15 Pengujian Sensor Tegangan..... | 51 |
| Gambar 4. 16 <i>Wiring</i> relay dan <i>fan</i> | 51 |
| Gambar 4. 17 <i>Wiring</i> BTS7960..... | 52 |
| Gambar 4. 18 Pengujian <i>Driver</i> BTS7960 | 52 |
| Gambar 4. 19 Elektroda..... | 54 |
| Gambar 4. 20 Penimbangan KOH..... | 55 |
| Gambar 4. 21 Percobaan Elektrolisis | 56 |
| Gambar 4. 22 Data Suhu Tabung Elektrolizer | 57 |
| Gambar 4. 23 Pengaturan Data Format For Signals..... | 59 |
| Gambar 4. 24 Hasil Estimasi Formula Fungsi Alih | 59 |
| Gambar 4. 25 Step Respons Close Loop | 60 |
| Gambar 4. 26 Penentuan Parameter L dan T..... | 61 |
| Gambar 4. 27 Simulasi Menggunakan Konstanta P <i>Ziegler Nichols</i> -1 | 64 |
| Gambar 4. 28 Simulasi Menggunakan Konstanta P-I <i>Ziegler Nichols</i> 1 | 65 |
| Gambar 4. 29 Simulasi Menggunakan Konstanta P-D <i>Ziegler Nichols</i> 1 | 66 |
| Gambar 4. 30 Simulasi Menggunakan Konstanta PID <i>Ziegler Nichols</i> 1 | 67 |
| Gambar 4. 31 Grafik Respon Suhu Mode Manual | 71 |
| Gambar 4. 32 Grafik Implementasi Kontrol P <i>Ziegler Nichols</i> 1 | 73 |
| Gambar 4. 33 Grafik Implementasi Kontrol P-I <i>Ziegler Nichols</i> 1 | 75 |
| Gambar 4. 34 Grafik Implementasi Kontrol P-D <i>Ziegler Nichols</i> 1 | 77 |
| Gambar 4. 35 Grafik Implementasi Kontrol PID <i>Ziegler Nichols</i> 1 | 78 |

DAFTAR NOTASI

| | |
|--------------|---|
| P | = Kontrol <i>Proportional</i> |
| K_p | = Konstanta <i>Proportional</i> |
| I | = Kontrol <i>Integral</i> |
| K_i | = Konstanta <i>Integral</i> |
| P_i | = Konstanta <i>Proportional</i> |
| D | = Kontrol <i>Derivative</i> |
| T | = Periode Waktu |
| K_d | = Konstanta <i>Derivative</i> |
| $error(s)$ | = Sinyal <i>error</i> saat ini |
| $lastError$ | = Sinyal <i>error</i> terakhir |
| T_d | = Waktu yang dibutuhkan untuk memprediksi keadaan selanjutnya |
| T_i | = Penjumlahan nilai <i>error</i> sebelumnya digantikan dengan waktu T_i |
| K_u | = Penguatan kritis |
| T_u | = Periode osilasi terukur |
| $Rise\ time$ | = Waktu naik |
| L | = Waktu tunda |
| Q | = Debit hidrogen |
| V | = Volume hidrogen |
| t | = Waktu |
| η | = efisiensi |

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini, hampir semua negara di dunia tengah berusaha beralih dari energi fosil ke energi terbarukan. Energi terbarukan merupakan sumber energi yang bersih dan dapat diperbaharui, yang mampu memenuhi kebutuhan energi di berbagai sektor sekaligus mengurangi dampak lingkungan akibat penggunaan energi konvensional yang menghasilkan gas rumah kaca. Beberapa manfaat dari energi terbarukan antara lain adalah memastikan keamanan dan ketersediaan energi, serta mengurangi polusi udara yang dapat membahayakan kesehatan (Hasan & Widayat, 2022). Gas Hidrogen merupakan bahan bakar terbarukan yang memiliki potensi besar untuk menggantikan energi fosil dalam berbagai penggunaan. Banyak negara melihat hidrogen sebagai sumber energi masa depan yang efisien dan ramah lingkungan, karena proses penggunaannya hanya menghasilkan uap air sebagai emisi, menjadikannya pilihan energi yang sangat bersih (Prasetyo dkk., 2020). Hidrogen (dalam bahasa Latin: *hydrogenium*, berasal dari bahasa Yunani *hydro* yang berarti air dan *genes* yang berarti membentuk) adalah unsur kimia dengan simbol H dan nomor atom 1 pada tabel periodik. Dalam kondisi suhu dan tekanan standar, hidrogen berbentuk gas diatomik yang sangat mudah terbakar, tidak memiliki warna maupun bau, bersifat non-logam, dan memiliki valensi tunggal (Alfani, 2021). Salah satu metode untuk memproduksi gas Hidrogen dengan menggunakan Green Hydrogen yaitu dengan cara elektrolisis air.

Elektrolisis adalah metode sederhana untuk menghasilkan hidrogen dengan mengalirkan arus listrik lemah melalui larutan elektrolit. Pada proses ini, gas oksigen terbentuk di anoda, sementara gas hidrogen dihasilkan di katoda. Pada umumnya, katoda dibuat dari platina atau logam inert lainnya jika hidrogen yang dihasilkan akan disimpan. Namun, jika gas tersebut akan langsung dibakar, oksigen yang terbentuk perlu mendukung proses pembakaran, sehingga kedua elektroda harus menggunakan bahan inert. Elektrolisis merupakan proses kimia yang mengonversi energi listrik menjadi energi kimia, dengan elektroda dan larutan elektrolit sebagai komponen utamanya. Karena proses ini berjalan lambat, berbagai

upaya diperlukan untuk meningkatkan efisiensi produksinya (Fazlunnazar dkk., 2020).

Proses elektrolisis air berjalan dengan sangat lambat, sehingga perlu dicari cara-cara untuk meningkatkan efisiensi produk. Salah satunya adalah dengan menambahkan zat terlarut yang bersifat elektrolit, modifikasi elektroda, variasi daya listrik yang digunakan, atau melalui cara-cara lain yang dapat meningkatkan efisiensi produk. Elektrolisis air sebagai sumber hidrogen telah lama dipelajari, dengan berbagai penelitian yang telah dilakukan, khususnya untuk menganalisis produktivitas dari berbagai metode yang masih perlu dikembangkan lebih lanjut. Dengan mempelajari berbagai tingkat produktivitas hidrogen yang dihasilkan oleh beberapa metode, diharapkan dapat tercipta generator H₂O dengan efisiensi yang tinggi (Fitriyanti, 2019).

Pada percobaan yang dilakukan oleh Rafi Akbar pada tahun 2024 yang mana pada katalis KOH dengan massa 2,81 gram diperoleh nilai efisiensi elektrolizer yang tertinggi. Dengan volume Hidrogen yang dihasilkan adalah sebanyak 22,7 mL dengan waktu selama 6 menit. Dalam penelitian ini, optimasi sistem elektrolisis pada alat HHO generator dilakukan dengan menerapkan kontrol PID untuk mengontrol suhu pada tabung elektrolizer yang digunakan pada proses elektrolisis, dengan tujuan meningkatkan efisiensi waktu produksi hidrogen. Penggunaan metode PID dipilih karena kemampuan adaptifnya dalam mengontrol variabel proses secara presisi. Kontrol PID dipilih dikarenakan adanya penelitian terdahulu oleh Kurniawan pada tahun 2023 yang membahas implementasi kontrol PID untuk mengatur suhu pada prototipe mesin pengering biji kopi, dengan tambahan fitur pemantauan berbasis IoT. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan kontrol PID efektif dalam menjaga suhu sesuai dengan *setpoint* yang diinginkan (Kurniawan dkk., 2023).

Dengan kontrol PID, suhu tabung elektrolizer dapat dipertahankan dalam rentang optimal yaitu pada suhu 40°C - 80°C. Rentang suhu tersebut dinilai optimal berdasarkan oleh penelitian yang berjudul *Assessment of the three most developed water electrolysis technologies: Alkaline Water Electrolysis, Proton Exchange Membrane and Solid-Oxide Electrolysis* oleh (Sebbahi dkk., 2022). Dengan meminimalkan error secara dinamis melalui aksi proportional, integral, dan

derivatif, yang bekerja untuk mengurangi fluktuasi, meningkatkan stabilitas proses, dan mencegah overheating atau pendinginan berlebih. Kombinasi ketiga aksi tersebut memastikan sistem elektrolisis berjalan lebih efisien, meningkatkan laju produksi hidrogen, serta mengurangi pemborosan energi pada proses elektrolisis.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada Tugas Akhir ini sebagai berikut :

1. Bagaimana cara menerapkan kontrol PID untuk mendapatkan parameter PID yang optimal pada suhu tabung elektrolizer pada proses elektrolisis?
2. Bagaimana perbandingan hasil produksi gas hidrogen dengan menggunakan kontrol PID dan tanpa menggunakan kontrol PID?
3. Bagaimana kinerja prototipe HHO Generator dengan menggunakan metode PID?
4. Bagaimana efisiensi waktu yang dihasilkan ketika menggunakan kontrol PID dalam proses produksi gas hidrogen pada generator HHO?

1.3 Batasan Penelitian

Pada tugas akhir ini memiliki beberapa batasan masalah untuk membatasi penelitian yakni sebagai berikut :

1. Pengujian dilakukan dalam skala laboratorium
2. Listrik *input* untuk proses elektrolisis tidak menggunakan *renewable energy*
3. Tidak menggunakan penyimpanan Hidrogen tabung gas bertekanan
4. Menggunakan mikrokontroller
5. Menggunakan KOH sebagai katalis pada larutan elektrolisis
6. Monitoring hanya dilakukan untuk memantau nilai sensor suhu, gas hidrogen, arus, dan tegangan

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari tugas akhir ini yakni sebagai berikut :

1. Dapat menerapkan kontrol PID untuk mendapatkan parameter PID yang optimal pada suhu tabung elektrolizer pada proses elektrolisis.
2. Dapat mengetahui hasil produksi gas hidrogen dengan menggunakan kontrol PID dan tanpa menggunakan kontrol PID.

3. Dapat mengetahui kinerja prototipe HHO Generator dengan menggunakan metode PID untuk menghasilkan gas hidrogen yang efisien.
4. Dapat meningkatkan efisiensi waktu dalam memproduksi gas hidrogen dengan penerapan metode PID.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari Tugas Akhir ini yakni sebagai berikut :

1. Dapat membuat prototipe HHO Generator dengan menerapkan kontrol PID untuk mendapatkan hasil gas hidrogen yang efisien.
2. Dapat menerapkan efisiensi dalam produksi hidrogen melalui proses elektrolisis
3. Bagi PPNS (Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya) adalah sebagai referensi mahasiswa dalam pembelajaran yang dapat diakses melalui perpustakaan kampus.
4. Sebagai referensi dan landasan ilmiah untuk dijadikan pengembangan pada penelitian selanjutnya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Penelitian Terdahulu

Bagian Kajian Penelitian Terdahulu berisi beberapa referensi yang relevan dengan topik tugas akhir, yang membahas tentang keseimbangan suhu pemanas, sensor pada HHO Generator, dan Katalis untuk menunjang efisiensi proses elektrolisis.

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu

| No. | Nama Peneliti dan Tahun Penelitian | Judul Penelitian | Hasil Penelitian |
|-----|------------------------------------|---|---|
| 1. | Putra, 2024 | Sistem Kontrol Dan Monitoring Hidrogen - Oksigen (HHO) Generator Berbasis Internet Of Things (IoT) | Penelitian ini mengembangkan sistem kontrol dan monitoring berbasis Internet of Things (IoT) untuk HHO generator, yang memungkinkan pemantauan dan pengendalian produksi gas hidrogen secara <i>real-time</i> . Dengan menggunakan sensor untuk mengukur konsentrasi gas hidrogen, arus, suhu, dan tekanan, sistem ini memastikan proses elektrolisis berjalan dengan aman dan efisien. (C. S. Putra, 2024) |
| 2. | Muhammad Ferdy, 2024 | Pengukuran Tegangan Listrik DC Dan Arus Listrik DC Untuk Pemantauan Dan Pengendalian Generator HHO Tipe Wet Cells Pada Generator Set Dengan Menggunakan Sensor INA219 dan Sensor ACS712 30A | Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, pengukuran tegangan dan arus listrik DC menggunakan sensor INA219 dan ACS712 pada sistem HHO tipe wet cells menunjukkan tingkat akurasi tinggi dengan rata-rata akurasi pembacaan masing-masing sebesar 99,01% dan 99,25%. |
| 3. | Fitriyanti, 2021 | Pengaruh Luas Permukaan Elektroda Dengan Penambahan Pwm <i>Controller</i> Terhadap Efisiensi Produksi Gas Hidrogen | Berdasarkan penelitian Fitriyanti (2021), optimasi sistem elektrolisis pada generator HHO dengan penambahan PWM |

| No. | Nama Peneliti dan Tahun Penelitian | Judul Penelitian | Hasil Penelitian |
|-----|-------------------------------------|--|--|
| | | Pada Proses Elektrolisis | <i>controller</i> menunjukkan peningkatan efisiensi produksi gas hidrogen, dengan efisiensi tertinggi sebesar 8,127% pada luas penampang elektroda 40 cm ² dengan daya 36 watt. Namun, efisiensi menurun seiring peningkatan daya, meskipun produktivitas gas meningkat. |
| 4. | Samuel Gideon, Maulana Fadhli, 2022 | Perancangan Dan Implementasi Prototype Sistem Otomatisasi Pada Sel Electrolyzer Penghasil Gas Brown (Hho) | Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan prototype sistem otomatisasi pada sel electrolyzer untuk menghasilkan gas Brown (HHO). Penelitian ini menggunakan sistem otomatisasi berbasis Arduino untuk memantau tegangan, waktu alir arus, dan konsentrasi elektrolit (Gideon & Fadhli, 2022) |
| 5. | Rafi Akbar, 2024 | Perancangan dan Proses Fabrikasi Hidrogen Generator Untuk Proton Exchange Membrane (PEMFC) Dengan Variasi Katalis KOH, NaCL, dan NaOH Serta Penambahan Konsentrasi Katalis | Penelitian ini menunjukkan bahwa jenis dan konsentrasi katalis (KOH, NaCl, dan NaOH) berpengaruh signifikan terhadap efisiensi elektrolisis. Katalis KOH dengan konsentrasi 0,05M menghasilkan efisiensi elektroliser tertinggi sebesar 1,70%. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi katalis, semakin tinggi pula efisiensi elektrolisis. |

Jurnal pertama mengembangkan sistem kontrol berbasis IoT untuk memantau dan mengendalikan parameter penting dalam proses elektrolisis HHO, yang relevan dengan penggunaan kontrol PID untuk memastikan pengendalian parameter yang lebih akurat dan terotomatisasi. Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem otomatisasi yang lebih canggih dapat meningkatkan efisiensi produksi

hidrogen. Jurnal kedua berfokus pada pengendalian arus dengan presisi tinggi, mendukung implementasi kontrol pemantauan yang relevan dengan penelitian Anda. Dalam hal ini, pengontrol PID dapat dioptimalkan untuk meningkatkan efisiensi dalam produksi hidrogen dengan pengaturan arus yang lebih stabil dan tepat. Jurnal ketiga mengindikasikan bahwa desain dan pengendalian parameter daya serta elektroda yang optimal sangat penting untuk mencapai efisiensi dan produktivitas yang baik dalam proses elektrolisis di mana pengendalian daya dan desain elektroda yang tepat juga akan diperhatikan untuk mendukung efisiensi. Jurnal keempat membahas bagaimana sistem otomatisasi dapat mengatur parameter dalam proses elektrolisis untuk mencapai kondisi optimal dalam produksi gas HHO, yang memberikan wawasan penting mengenai pentingnya pengaturan parameter efisien dalam optimasi produksi hidrogen. Terakhir, jurnal kelima digunakan peneliti sebagai bahan pertimbangan untuk penggunaan katalis KOH dengan konsentrasi yang lebih tinggi untuk meningkatkan efisiensi produksi hidrogen.

Keseluruhan jurnal diatas ini menunjukkan bahwa sistem pengendalian otomatis berbasis kontrol PID yang efektif, pengaturan parameter yang tepat seperti daya dan elektroda, serta teknologi *monitoring* dapat memberikan kontribusi signifikan dalam mengoptimalkan efisiensi produksi hidrogen pada sistem elektrolisis HHO Generator.

2.2 Kajian Pustaka

Dalam tugas akhir, kajian pustaka berfungsi sebagai landasan konseptual yang mendasari seluruh proses penelitian. Bagian ini mencakup tinjauan terhadap literatur, penelitian terdahulu, serta konsep-konsep kunci yang relevan dengan topik penelitian. Kajian pustaka tidak hanya memberikan pemahaman teoritis yang lebih mendalam, tetapi juga membantu peneliti dalam merumuskan hipotesis, menyusun metode penelitian, dan menganalisis data secara sistematis. Dengan menyajikan penjelasan mendetail tentang teori-teori yang mendukung penelitian, kajian pustaka berperan penting dalam membangun kerangka kerja ilmiah. Selain itu, landasan teori yang kuat memberikan perspektif yang komprehensif untuk memahami dan

menjelaskan fenomena yang menjadi fokus penelitian, sekaligus memastikan bahwa penelitian memiliki pijakan intelektual yang kokoh.

2.2.1 *Proportional, Integral, Derivative (PID)*

PID (*Proportional Integral Derivative*) adalah sistem pengontrolan yang terdiri dari tiga fungsi utama: P, I, dan D. Pengontrolan ini merupakan model matematis yang mengkombinasikan fungsi *Proportional*, *Integral*, dan *Derivative* untuk menghasilkan respon kontrol yang optimal. PID dikenal sebagai pengontrol standar di berbagai aplikasi industri karena kemampuannya untuk mengurangi *overshoot* dan mencapai respon yang stabil.

Dalam sistem PID, fungsi *Proportional* (P) berfungsi untuk memberikan respon yang sebanding dengan kesalahan yang terjadi, *Integral* (I) bertugas mengurangi kesalahan kumulatif dari waktu ke waktu, dan *Derivative* (D) memperhitungkan laju perubahan kesalahan. Kombinasi dari ketiga fungsi ini memberikan fleksibilitas dan kontrol yang lebih presisi terhadap sistem yang dikendalikan.

PID dianggap sebagai bentuk matematika yang efektif karena dapat mengurangi *overshoot* dan mencapai kestabilan dalam waktu singkat. Untuk mencapai kontrol yang stabil, variabel proses harus disesuaikan dengan set point sehingga kontrol yang stabil dapat dicapai. Hal ini memastikan bahwa sistem tetap stabil dan responsif terhadap perubahan variabel yang dikendalikan.

Meskipun PID merupakan sistem pengontrolan yang mudah digunakan, setiap parameter P, I, dan D memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Parameter P dapat membuat sistem terlalu responsif jika nilainya terlalu tinggi, sedangkan parameter I dapat menyebabkan akumulasi kesalahan jika tidak diatur dengan benar. Parameter D dapat membuat sistem lambat merespons jika nilainya terlalu rendah atau terlalu sensitif terhadap noise jika nilainya terlalu tinggi. Oleh karena itu, ketiga parameter ini harus diatur dengan cermat untuk mencapai keseimbangan yang optimal.

Dalam praktiknya, parameter-parameter ini sering kali disesuaikan melalui proses tuning untuk memastikan bahwa sistem beroperasi dengan efisiensi maksimal. Tuning PID melibatkan penyesuaian nilai-nilai parameter untuk

meminimalkan kesalahan dan mencapai respon yang diinginkan. Meskipun proses tuning ini bisa memerlukan waktu dan keahlian, hasil akhirnya adalah sistem pengontrolan yang sangat efektif dan dapat diandalkan.

Secara keseluruhan, PID adalah metode pengontrolan yang sangat penting dan banyak digunakan dalam berbagai aplikasi karena kemampuannya untuk memberikan kontrol yang presisi dan stabil. Meskipun memiliki tantangan dalam hal penyesuaian parameter, keuntungan yang ditawarkan oleh sistem PID dalam meningkatkan respon dan stabilitas membuatnya menjadi pilihan utama dalam pengontrolan proses industri (Nurrahma dkk., 2023).

2.2.2 Pulse Width Modulation (PWM)

Pulse Width Modulation (PWM) adalah salah satu teknik dalam sistem kontrol yang mengatur lebar pulsa sinyal dalam periode tertentu. Teknik ini melibatkan perubahan lebar pulsa positif dan negatif, atau sebaliknya, dalam frekuensi sinyal yang tetap. PWM banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk modulasi data sinyal, pengaturan daya atau tegangan, efek suara, dan penguat. PWM memungkinkan pengendalian yang lebih presisi terhadap perangkat elektronik dengan mengatur durasi waktu sinyal aktif dibandingkan dengan kondisi tidak aktif.

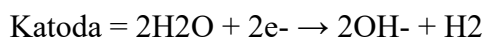
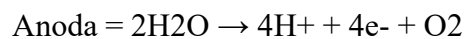
Dalam konteks modulasi data sinyal, PWM sering digunakan untuk mentransmisikan informasi dengan mengubah lebar pulsa sinyal yang dikirimkan, sehingga data dapat dikodekan dan ditransmisikan dengan efisien. PWM juga berperan penting dalam pengendalian motor listrik, di mana lebar pulsa menentukan kecepatan dan arah motor. Dalam pengendalian daya, PWM memungkinkan pengaturan daya yang diterima oleh perangkat seperti lampu LED atau elemen pemanas tanpa mengubah tegangan keseluruhan yang diterapkan pada sistem (Pranata, 2021).

2.2.3 Hidrogen Generator

2.2.3.1 Pengertian dan Cara Kerja Hidrogen Generator

Hidrogen Generator adalah perangkat yang mengubah air (H_2O) yang dicampur dengan katalis menjadi gas HHO , yang kemudian digunakan pada fuel

cell untuk dikonversi menjadi energi listrik. Prinsip kerja Hidrogen Generator berdasarkan pada elektrolisis air, yang berfungsi untuk memproduksi gas hidrogen. Elektrolisis adalah proses pemecahan senyawa air (H₂O) menjadi gas hidrogen (H₂) dan oksigen (O₂) dengan menggunakan arus listrik. Proses ini terjadi ketika arus listrik mengalir melalui larutan elektrolit dan menyebabkan reaksi kimia. Larutan elektrolit dapat menghantarkan listrik karena mengandung ion-ion yang dapat bergerak bebas, yang bertugas menghantarkan arus listrik. Proses hantaran listrik terjadi ketika sumber arus searah memberikan muatan yang berbeda pada kedua elektroda. Katoda, yang terhubung dengan kutub negatif, bermuatan negatif, sementara anoda, yang terhubung dengan kutub positif, bermuatan positif. Ion-ion tertentu dalam larutan akan menerima elektron dari katoda, sementara ion lainnya akan melepaskan elektron ke anoda. Elektron kemudian mengalir kembali ke katoda melalui sumber arus searah. Reaksi kimia yang terjadi selama elektrolisis adalah sebagai berikut:



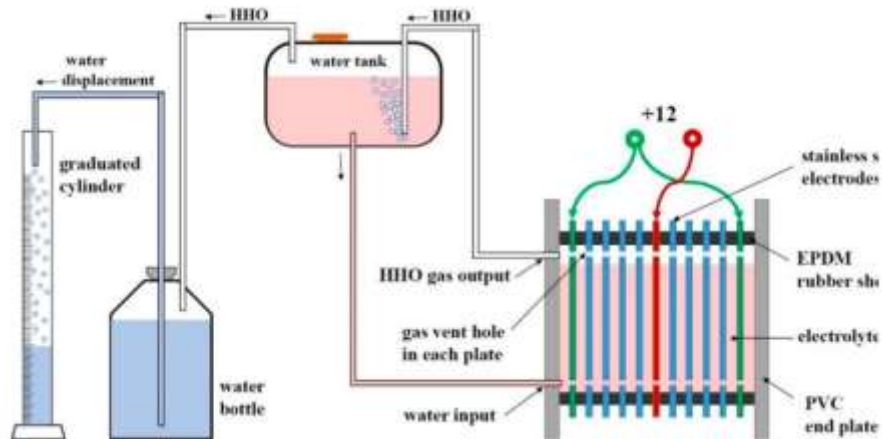
Dari reaksi tersebut, dapat disimpulkan bahwa aliran arus listrik dalam elektrolisis menghasilkan gelembung gas hidrogen dan oksigen. Gelembung gas oksigen terbentuk di pelat positif (anoda), sementara gelembung gas hidrogen terbentuk di pelat negatif (katoda). Beberapa faktor yang mempengaruhi proses elektrolisis meliputi penggunaan katalisator, sifat logam elektroda, dan jenis larutan elektrolit yang digunakan (Rafi Akbar, 2024). Faktor yang mempengaruhi elektrolisis yaitu penggunaan katalisator, sifat logam dari material elektroda, serta larutan elektrolit.

2.2.3.2 Tipe Hidrogen Generator

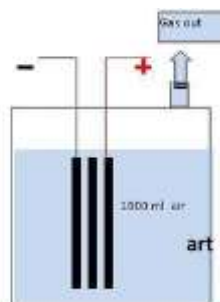
Hidrogen Generator terbagi menjadi dua jenis, yaitu tipe kering (dry cell) dan tipe basah (wet cell). Tipe dry cell adalah Hidrogen Generator di mana sebagian elektrodanya tidak sepenuhnya terendam dalam elektrolit, melainkan hanya mengisi celah-celah antara elektroda. Keunggulan tipe dry cell meliputi penggunaan air yang lebih efisien, karena hanya air di antara lempengan cell yang dielektrolisis. Selain itu, panas yang dihasilkan relatif kecil karena adanya sirkulasi

antara air panas dan dingin di reservoir, serta konsumsi arus listrik yang lebih rendah akibat minimnya daya yang terkonversi menjadi panas.

Sebaliknya, tipe wet cell memiliki elektroda yang sepenuhnya terendam cairan elektrolit dalam sebuah bejana air. Pada tipe ini, seluruh permukaan elektroda berfungsi dalam proses elektrolisis untuk menghasilkan gas HHO. Keunggulan tipe wet cell adalah gas yang dihasilkan lebih stabil, perawatan generator lebih sederhana, dan proses pembuatan rancang bangunnya lebih mudah. Dalam penelitian ini, digunakan tipe wet cell untuk memastikan produksi gas yang stabil sehingga dapat dianalisis debit hidrogen yang dihasilkan, efisiensi elektroliser, serta efisiensi fuel cell. Adapun gambar dry cell dan wet cell pada gambar berikut :



Gambar 2. 1 *Dry Cell* Hidrogen Generator
Sumber : (Najafi dkk., 2021)



Gambar 2. 2 *Wet Cell* Hidrogen Generator
Sumber : (Rafi Akbar, 2024)

2.2.3.3 Komponen Rancang HHO Generator

1. Tabung Reaktor

Tabung reaktor pada Hidrogen Generator berfungsi sebagai tempat untuk proses elektrolisis air (H_2O) yang mengubahnya menjadi hidrogen dan oksigen. Dalam penelitian ini, digunakan tabung reaktor dengan volume 1 liter yang terbuat dari bahan biokeramik. Tabung reaktor yang digunakan dalam proses elektrolisis air bertipe wet cell berukuran 10 inci dengan saluran masuk dan keluar berukuran 3/4 inci. Semua elektroda dalam tabung terendam dalam cairan elektrolit, sehingga seluruh permukaan elektroda terendam air, memungkinkan proses elektrolisis yang menghasilkan gas HHO.

Pada penelitian ini katalis yang digunakan adalah jenis KOH dengan konsentrasi 0.05M dengan Molekul Reaktif KOH adalah 56, jadi massa KOH yang digunakan sebesar 2,81 gram. Hal ini dilakukan sesuai dengan penelitian Rafi Akbar, 2024. Dimana pada katalis KOH dengan massa 2,81 gram diperoleh nilai efisiensi elektrolizer yang tertinggi. Dengan massa Hidrogen yang dihasilkan adalah sebanyak 22.7mL dengan waktu selama 6 menit. Hal ini dapat dilihat dari tabel hasil percobaan dibawah ini:

Tabel 2. 2 Tabel Hasil Percobaan Katalis KOH

| KOH | | | | | | | | |
|-----|----------------|--|----|---|---|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| No | Konsentrasi | v_{H_2} (m^3) $\times 10^{-5}$ | t | Debit (Q) H_2 (m^3/s) $\times 10^{-8}$ | \dot{m}_{H_2} (kg/s) $\times 10^{-9}$ | Daya (P) H_2 (Watt) | Daya (P) Input (Watt) | Efisiensi elektroliser |
| 1. | 0,01M (0,56gr) | 1,70 | 6' | 4,73 | 4,26 | 0,512 | 40,53 | 1,26% |
| 2. | 0,02M (1,12gr) | 1,65 | 6' | 4,59 | 4,13 | 0,497 | 40,30 | 1,23% |
| 3. | 0,03M (1,68gr) | 1,95 | 6' | 5,43 | 4,88 | 0,587 | 40,40 | 1,45% |
| 4. | 0,04M (2,24gr) | 2,10 | 6' | 5,84 | 5,26 | 0,632 | 40,43 | 1,56% |
| 5. | 0,05M (2,81gr) | 2,27 | 6' | 6,33 | 5,70 | 0,685 | 40,33 | 1,70% |

Sumber : Rafi Akbar, 2024

2. Elektroda

Elektroda terdiri dari elektroda dengan muatan positif yang disebut anoda dan elektroda dengan muatan negatif yang disebut katoda. Dalam proses elektrolisis air, peneliti memilih stainless steel untuk anoda dan tembaga (Cu) untuk katoda. Pemilihan stainless steel untuk anoda didasarkan pada penelitian Rafi Akbar (2024), yang menunjukkan bahwa stainless steel 304 adalah jenis yang paling efektif untuk digunakan pada anoda. Sementara itu, tembaga (Cu) dipilih untuk katoda karena sifatnya yang sebagai oksidator kuat, yang diharapkan dapat lebih efisien dalam menghasilkan gas hidrogen selama reaksi kimia di bagian katoda.

Spesifikasi elektroda pada anoda dan katoda ditetapkan sama, yaitu berbentuk persegi panjang dengan ukuran $15\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 2\text{ mm}$, dengan 6 plat pada anoda dan 6 plat pada katoda, sehingga total jumlah elektroda adalah 12 plat.

3. Tabung Filter

Tabung filter adalah tabung yang digunakan untuk memisahkan atau menyaring hidrogen dan oksigen yang dihasilkan oleh hidrogen generator. Pemisahan ini dilakukan dengan memanfaatkan air dalam tabung filter untuk mengikat oksigen, sehingga oksigen tidak ikut mengalir bersama hidrogen menuju tabung penyimpanan. Proses ini terkait dengan kelarutan gas dalam air, di mana oksigen memiliki kelarutan lebih tinggi (0,0034) dibandingkan hidrogen yang hanya 0,00016. Tabung filter yang digunakan memiliki ukuran 10 inci dengan saluran masuk dan keluar berukuran 1/4 inci.

4. Gelas Ukur

Gelas ukur atau silinder ukur adalah alat laboratorium berbentuk tabung silinder dengan skala pengukuran pada dindingnya, yang digunakan untuk mengukur volume cairan secara akurat. Dalam konteks pengukuran gas, gelas ukur dapat diisi penuh dengan air dan dibalik dalam wadah berisi air untuk menangkap gas yang dihasilkan, seperti hidrogen dari HHO generator. Alat ini memanfaatkan konsep displacement air, di mana gas yang masuk ke dalam gelas ukur akan menggantikan air sehingga volume gas dapat diukur berdasarkan jumlah air yang keluar dari tabung.

Prinsip kerja metode ini didasarkan pada Hukum Archimedes dan perbedaan massa jenis antara air dan gas. Gas hidrogen yang memiliki massa jenis jauh lebih ringan daripada air secara alami akan naik ke atas dan menggantikan air di dalam gelas ukur. Volume air yang keluar dari gelas ukur sebanding dengan volume gas yang masuk, sehingga metode ini memberikan cara sederhana dan efektif untuk mengukur volume gas yang dihasilkan.

2.2.3.4 Efisiensi produksi Hidrogen pada HHO Generator

Berdasarkan penelitian terdahulu terdapat acuan untuk hasil produksi gas Hidrogen pada alat HHO Generator yang telah dibuat. Terdapat beberapa persamaan secara teoritis untuk mendapatkan nilai efisiensi dari HHO Generator ini sebagai berikut :

- a) Persamaan Debit Hidrogen :

$$Q \text{ Hidrogen} = \frac{V \text{ Hidrogen}}{t} \quad (2.1)$$

Q = Debit hidrogen

V = Volume hidrogen

t = Waktu elektrolisis

- b) Persamaan Efisiensi Waktu Produksi :

$$\eta \text{ waktu} = \frac{t1}{t2} \times 100\% \quad (2.2)$$

η = efisiensi

$t1$ = waktu awal sebelum optimasi

$t2$ = waktu sesudah optimasi

2.3 Hardware yang digunakan

Pada penelitian Tugas Akhir ini memiliki bagian *hardware* yang akan digunakan dalam mewujudkan penelitian Tugas Akhir ini. Adapun beberapa *hardware* tersebut adalah :

2.2.4 ESP32

ESP32 (*Espressif System Platform 32*) adalah mikrokontroler yang dikembangkan oleh *Espressif System*, sebuah perusahaan yang berpusat di Shanghai, China. Perangkat ini mulai dikenal sejak 2016 sebagai penerus ESP8266. Mikrokontroler ini dilengkapi dengan fitur-fitur canggih seperti kemampuan Wi-Fi, Bluetooth terintegrasi, prosesor dengan kecepatan tinggi, serta konsumsi daya yang rendah. ESP32 banyak digunakan untuk mengontrol perangkat elektronik dan menghubungkannya ke jaringan nirkabel, menjadikannya sangat ideal untuk proyek *Internet of Things* (IoT).

Prosesor ESP32 dapat beroperasi secara mandiri atau bersamaan, tergantung pada kebutuhan aplikasi, memungkinkan perangkat ini menangani beberapa tugas sekaligus dengan efisiensi tinggi. Modul ini memiliki 34 pin *input/output* yang dapat dimanfaatkan untuk mengakses sensor, aktuator, atau perangkat lain. Jumlah ini jauh lebih banyak dibandingkan dengan ESP8266 yang hanya memiliki 12 pin *input/output* (Kusumah & Pradana, 2019).



Gambar 2. 3 ESP32

Sumber : <https://www.alamy.com/stock-photo/esp32>

Berikut adalah tabel spesifikasi ESP32 :

Tabel 2. 3 Spesifikasi ESP32

| Fitur | ESP32 |
|-------------------|---|
| Prosesor | Dual-core Xtensa LX6 32-bit up to 240 Mhz |
| RAM | 520 KB SRAM |
| Flash Memory | 4MB |
| GPIO Pins | 34 pins |
| WiFi | Built-in 2.4 GHz Wifi |
| Bluetooth | Built-in BLE 4.2 |
| ADC | 12-bit, 18 channels |
| DAC | 8-bit, 2 channels |
| PWM Channels | 16 channels |
| Operating Voltage | 3.3 V |
| IDE Support | Arduino IDE, ESP-IDF, MicroPython |
| Real Time Clock | Ya |

2.2.5 Power Supply

Power Supply adalah perangkat yang berfungsi untuk mentransfer tegangan dari satu sumber ke sumber lainnya. Alat ini biasanya digunakan pada komputer atau laptop untuk menyuplai tegangan ke berbagai komponen atau perangkat keras, seperti hard drive, motherboard, kipas, dan sebagainya. *Power Supply* bekerja dengan mengambil *input* berupa tegangan arus bolak-balik (AC), kemudian mengonversinya menjadi arus searah (DC) sebelum mendistribusikannya ke berbagai komponen komputer.

Arus searah (DC) sangat dibutuhkan untuk menjalankan perangkat, sehingga sering digunakan dalam pengoperasian perangkat keras. Sebaliknya, arus bolak-balik (AC) adalah jenis arus yang bergerak maju-mundur secara berlawanan. Dalam konteks komputer, *Power Supply* berperan sebagai pengubah tegangan yang mengonversi AC menjadi DC, sehingga seluruh perangkat keras yang memerlukan arus DC dapat menerima suplai tegangan dari perangkat ini.



Gambar 2. 4 Power Supply
Sumber : <https://www.google.com/powersupply>

2.2.6 LM2596

Modul regulator LM2596 adalah alat pengatur tegangan jenis switching yang sangat efisien, khususnya untuk menurunkan tegangan (step-down). Modul ini mampu mengubah tegangan *input* yang tinggi menjadi tegangan *output* yang lebih rendah dengan efisiensi tinggi. Dengan kemampuan menangani beban hingga 3A, modul ini sangat cocok untuk berbagai aplikasi yang membutuhkan tegangan stabil dan andal. Teknologi switching yang digunakan pada modul ini membuat konversi daya lebih efisien, mengurangi panas yang dihasilkan, dan memperpanjang umur komponen. Efisiensi ini sangat penting untuk perangkat yang memerlukan pengelolaan daya optimal, seperti peralatan industri dan elektronik sehari-hari.

Selain itu, modul LM2596 dilengkapi dengan fitur pengaturan tegangan yang fleksibel. Dengan potensiometer bawaan, pengguna dapat dengan mudah menyesuaikan tegangan *output* sesuai kebutuhan. Fitur ini membuat modul LM2596 lebih serbaguna, sehingga dapat digunakan dalam berbagai aplikasi dan konfigurasi. Dengan efisiensi tinggi dan kemudahan penggunaan, modul ini menjadi pilihan yang ideal untuk berbagai kebutuhan pengaturan daya (Hamala, t.t.)



Gambar 2. 5 LM2596
Sumber : <https://www.google.com/lm2596>

2.2.7 Voltage Sensor

Voltage Sensor INA219 adalah modul sensor canggih yang digunakan untuk mengukur tegangan, arus, dan daya listrik secara presisi. Sensor ini sering

digunakan dalam proyek elektronika untuk memonitor konsumsi daya pada sistem yang melibatkan baterai, solar panel, atau beban listrik lainnya (Afandi & Jamaaluddin, 2021) Modul ini dirancang dengan kemampuan kalibrasi yang memungkinkan pengukuran dengan akurasi tinggi hingga 1%. Sensor ini juga mampu bekerja dalam lingkungan dengan daya rendah, sehingga ideal untuk aplikasi IoT dan sistem yang hemat energi. Pada penelitian ini sensor tegangan digunakan untuk memantau tegangan yang terhubung dengan elektroda. Tegangan berperan penting dalam proses elektrolisis sesuai dengan penelitian terdahulu bahwa semakin tinggi tegangan semakin tinggi juga perubahan suhu yang terjadi (Fazlunnazar dkk., 2020).



Gambar 2. 6 *Voltage Sensor*

Sumber : <https://www.google.com/voltagesensor>

2.2.8 *Current Sensor (ACS712)*

ACS712 adalah sensor arus berbasis efek Hall yang dirancang dengan presisi tinggi untuk mendeteksi arus AC maupun DC. Sensor ini sering digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk di industri, otomotif, sistem komunikasi, dan keperluan komersial. Umumnya, ACS712 dimanfaatkan untuk pengendalian motor, deteksi beban listrik, serta pengoperasian pada sistem *switched-mode power supplies* (Lubis dkk., 2022). Dengan *output* analog yang proporsional terhadap arus yang terdeteksi, ACS712 dapat dengan mudah dihubungkan ke mikrokontroler seperti Arduino, Raspberry Pi, atau ESP32 untuk pemantauan arus secara *real-time*. ACS712 tersedia dalam beberapa varian dengan kapasitas pengukuran yang berbeda, seperti $\pm 5A$, $\pm 20A$, dan $\pm 30A$, sehingga memungkinkan pengguna untuk memilih modul yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi mereka. Modul ini sangat populer dalam proyek elektronika, termasuk sistem tenaga surya, alat pemantauan daya, dan perlindungan beban. Pada penelitian ini sensor arus digunakan dalam memantau arus yang terhubung dengan elektroda. Arus listrik berperan penting dalam menghasilkan flow rate gas hidrogen yang dihasilkan dari proses elektrolisis,

sesuai dengan Hukum Faraday 1 : Jumlah zat yang dihasilkan pada elektroda berbanding lurus dengan jumlah arus listrik yang melalui elektrolisis (Fazlunnazar dkk., 2020)



Gambar 2. 7 *Current Sensor ACS712*

Sumber : <https://www.google.com/currentsensorACS712>

2.2.9 Sensor Gas Hidrogen MICS-5524

Sensor MICS5524 adalah sensor gas yang digunakan untuk mendeteksi konsentrasi gas hidrogen (H_2) dengan tingkat sensitivitas yang tinggi. Sensor ini bekerja berdasarkan prinsip deteksi gas menggunakan elemen semikonduktor, yang menghasilkan *output* sinyal analog yang berbanding lurus dengan konsentrasi gas hidrogen yang terdeteksi. MICS5524 memerlukan suplai tegangan DC sekitar 5V untuk dapat beroperasi dengan baik.

Sensor ini banyak digunakan dalam berbagai aplikasi yang memerlukan pemantauan hidrogen, seperti sistem keamanan untuk deteksi kebocoran hidrogen, aplikasi di industri yang menggunakan hidrogen, atau dalam proyek IoT yang mengawasi konsentrasi gas hidrogen di lingkungan tertentu. Dengan konsumsi daya yang rendah dan kompatibilitas yang baik dengan mikrokontroler, MICS5524 adalah pilihan yang efisien dan andal untuk aplikasi yang membutuhkan deteksi gas hidrogen secara *real-time*.



Gambar 2. 8 Sensor MICS-5524

Sumber : <https://www.google.com/mics5524>

2.2.10 Temperature Sensor (RTD PT100)

RTD (*Resistance Thermal Detector*) atau Detektor Suhu Berbasis Resistansi adalah alat yang digunakan untuk mendeteksi nilai suhu dengan memanfaatkan kawat berbahan platina. Nilai resistansi alat ini akan meningkat seiring dengan naiknya suhu, dan sebaliknya resistansi akan menurun ketika suhu menurun. Elemen sensor terbuat dari platina murni, yang memberikan perlindungan terhadap kerusakan fisik. Prinsip kerja sensor RTD adalah bahwa nilai resistansinya sebanding secara linear dengan perubahan suhu yang terdeteksi (Rofiq, t.t.)

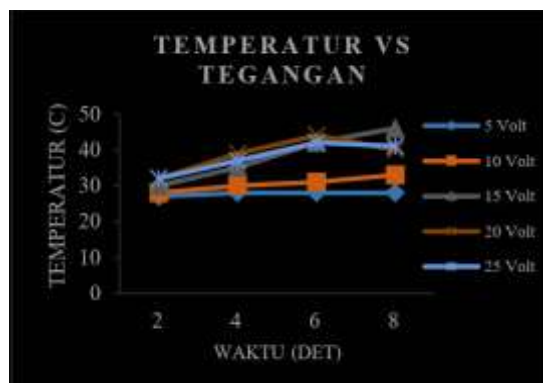
PT100 biasanya digunakan dalam aplikasi industri, laboratorium, atau penelitian yang memerlukan pengukuran suhu dengan presisi tinggi. Sensor ini tersedia dalam beberapa konfigurasi seperti *2-wire*, *3-wire*, dan *4-wire*, di mana konfigurasi *3-wire* dan *4-wire* memberikan kompensasi terbaik untuk resistansi kabel, sehingga menghasilkan pengukuran yang lebih akurat.



Gambar 2. 9 *Temperature Sensor* (PT100)

Sumber : www.bing.com

Pada penelitian terdahulu lamanya proses elektrolisis tidak berpengaruh secara signifikan terhadap kenaikan suhu pada elektroda. Pada penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Fahlunnazar pada tahun 2020 tegangan merupakan faktor utama untuk terjadinya kenaikan suhu secara signifikan. Terbukti dari gambar grafik di bawah ini :



Gambar 2. 10 Hubungan Waktu Tegangan dan Temperatur

Sumber : (Fazlunnazar dkk., 2020)

Dari Gambar 2.10 dapat diketahui bahwa pada tegangan 5 dan 10 Volt temperatur tidak dapat naik atau berubah secara signifikan. Namun, kenaikan suhu dapat diperoleh dengan lebih cepat saat menggunakan tegangan 20 dan 25 Volt.

2.2.11 Modul MAX31865

MAX31865 adalah modul pengondisi sinyal khusus yang dirancang untuk menghubungkan sensor suhu berbasis RTD (*Resistance Temperature Detector*), seperti PT100 dan PT1000, dengan mikrokontroler. Modul ini berfungsi untuk mengonversi perubahan resistansi sensor RTD menjadi data digital yang dapat diolah oleh mikrokontroler melalui antarmuka SPI.

MAX31865 dilengkapi dengan jembatan Wheatstone bawaan dan amplifier presisi untuk memastikan pengukuran yang akurat dan stabil. Modul ini juga mendukung berbagai konfigurasi kabel sensor (*2-wire*, *3-wire*, dan *4-wire*) dengan kemampuan kompensasi resistansi kabel pada konfigurasi *3-wire* dan *4-wire*, menjadikannya pilihan ideal untuk aplikasi yang memerlukan akurasi tinggi.



Gambar 2. 11 Modul MAX31865
Sumber : www.bing.com

2.2.12 Modul LCD

LCD (*Liquid Crystal Display*) adalah jenis layar elektronik yang dibuat menggunakan teknologi CMOS *logic*, yang bekerja tanpa menghasilkan cahaya sendiri melainkan memanfaatkan pantulan cahaya dari lingkungan sekitar. Pantulan ini dapat diarahkan melalui metode *front-lit* untuk menyinari layar atau *back-lit* untuk menerangi dari belakang. LCD berfungsi sebagai perangkat tampilan untuk menampilkan data seperti karakter, huruf, angka, ataupun grafik.

LCD terdiri dari campuran senyawa organik cair yang berada di antara lapisan kaca bening dengan elektroda transparan berbahan indium oksida, membentuk tampilan berbasis *seven-segment* atau tampilan karakter lainnya dengan penerangan dari depan atau belakang. Ketika elektroda diaktifkan dengan

memberi tegangan listrik, molekul cairan organik yang panjang dan fleksibel akan menyusun diri sesuai arah medan listrik. Lapisan *sandwich* dari polarizer berfungsi untuk mengontrol cahaya secara vertikal dan horizontal melalui lapisan belakang sehingga membentuk pola tampilan. Cahaya yang terpolarisasi akan melewati molekul cairan kristal yang telah disusun untuk menghasilkan tampilan karakter atau data yang diinginkan (Natsir dkk., 2019). Pada penelitian ini LCD digunakan untuk menampilkan nilai-nilai yang diperoleh dari pembacaan sensor tegangan, arus, suhu, dan MICS-5524.



Gambar 2. 12 LCD
Sumber : www.bing.com

2.2.13 *Driver* BTS7960

Driver BTS7960 adalah perangkat elektronik yang berfungsi untuk mengatur tegangan DC (arus searah) ke level yang diinginkan, baik untuk menurunkan (*buck*) maupun meningkatkan (*boost*) tegangan. Perangkat ini mengatur tegangan *output* dengan cara yang fleksibel, memungkinkan tegangan *output* menjadi lebih rendah atau lebih tinggi dari tegangan *input*.

Keunggulan utama dari *driver* BTS7960 adalah fleksibilitas dalam merancang sistem untuk memenuhi kebutuhan spesifik, seperti pada penelitian ini yang berfokus pada sistem elektrolisis HHO Generator. Dengan menggunakan *driver* BTS7960, tegangan dapat diatur dengan lebih akurat dan dapat diterapkan dalam sistem elektrolisis. Hal ini memastikan bahwa sel elektrolisis dapat beroperasi dengan efisien meskipun tegangan sumber daya tidak tetap atau berfluktuasi. Penggunaan *driver* ini juga memungkinkan untuk menyesuaikan desain sesuai dengan kebutuhan eksperimen, menghemat biaya, serta memperoleh

pemahaman lebih dalam mengenai cara kerja dan pengaturan *driver* untuk meningkatkan efisiensi produksi hidrogen.



Gambar 2. 13 *Driver* BTS7960

Sumber : www.bing.com

Pada penelitian tugas akhir ini *driver* digunakan untuk menerima sinyal pwm dari ESP32 sehingga tegangan keluaran yang menuju elektroda dapat terkontrol dan harapannya suhu pada elektroda atau tabung *electrolyzer* dapat stabil.

2.2.14 DC Fan/Blower

Turbo mini *fan* brushless adalah kipas mini yang digerakkan oleh motor *brushless* DC (BLDC), yang berarti motor tersebut tidak menggunakan sikat untuk mengalirkan arus ke rotor, sehingga mengurangi gesekan dan meningkatkan efisiensi serta daya tahan. Motor brushless bekerja dengan prinsip elektromagnetik, di mana medan magnet dihasilkan oleh stator untuk menggerakkan rotor. Kipas ini dirancang untuk memberikan aliran udara dengan ukuran yang kompak namun kuat, sering digunakan pada aplikasi yang memerlukan pendinginan atau ventilasi di ruang terbatas.

Sebagai aktuator, turbo mini *fan brushless* sering digunakan untuk mengontrol suhu dan aliran udara dalam berbagai perangkat elektronik, sistem ventilasi, dan aplikasi lainnya. Dengan kontrol kecepatan yang presisi melalui sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*), kipas ini dapat menyesuaikan kecepatannya untuk memenuhi kebutuhan sistem. Keunggulan kipas *brushless* meliputi efisiensi tinggi, umur panjang, serta kemampuan bekerja dengan lebih hening dan stabil dibandingkan motor brushed konvensional (Reski Ramadhan, 2023). Pada penelitian tugas akhir ini *fan* berfungsi untuk menyalurkan udara ke arah *electrolyzer* sehingga dapat menjaga stabilnya suhu yang ada pada tabung *electrolyzer*.



Gambar 2. 14 Turbo Mini Fan
Sumber : www.bing.com

2.2.15 Relay

Relay adalah saklar listrik yang bekerja menggunakan prinsip elektromagnetik. Alat ini memiliki dua bagian utama, yaitu kumparan elektromagnet (*coil*) dan mekanisme kontak saklar. Cara kerjanya sederhana: ketika arus listrik kecil mengalir ke kumparan, kumparan tersebut berubah menjadi magnet yang menarik kontak saklar. Hal ini membuat kontak tersambung dan memungkinkan arus listrik dengan tegangan lebih tinggi mengalir (Budyanto dkk., 2020)

Relay tersedia dalam berbagai tipe, seperti relay elektromagnetik, solid-state relay, dan reed relay, yang masing-masing memiliki keunggulan dan aplikasi tertentu. Dalam penelitian berbasis *Internet of Things* (IoT), relay sering digunakan untuk mengintegrasikan perangkat elektronik dengan sensor dan sistem kontrol otomatis, memungkinkan pengoperasian yang efisien dan dapat diakses secara jarak jauh.



Gambar 2. 15 Relay
Sumber : <https://www.google.com/relay>

2.2.16 Push Button

Push button adalah salah satu komponen elektronika yang bekerja dengan cara ditekan. Fungsinya adalah sebagai saklar untuk menyambungkan atau memutuskan aliran listrik. *Push button* memiliki dua fungsi utama, yaitu menyala

(on) dan mati (off). Karena cara kerjanya yang sederhana, *push button* sering digunakan sebagai komponen penting dalam sistem kontrol, terutama untuk memberikan *input* atau memicu suatu aksi pada sistem (Sulaeman dkk., 2022). Pada penelitian tugas akhir ini *push button* berfungsi untuk menjadi *input* untuk menyalakan mode optimasi yaitu dengan ESP32 yang nantinya mengirimkan sinyal *pwm* ke *konverter*.



Gambar 2. 16 *Push Button*
Sumber : <https://www.google.com/pushbutton>

2.2.17 Modul RTC (*Real Time Clock*)

Modul RTC DS3231 adalah salah satu module yang berfungsi sebagai RTC (*RealTime Clock*) atau pewaktuan digital serta adanya fitur pengukur suhu yang terdapat didalam 1 module. *Interface* atau antar muka untuk mengakses modul ini yaitu menggunakan i2c atau *two wire* (SDA dan SCL). Module DS3231 RTC ini sudah tersedia dengan baterai CR2032 3V yang berfungsi sebagai back up RTC apabila daya utama mati. Selain itu terdapat juga EEPROM AT24C32 yang bisa memberi 32k EEPROM untuk menyimpan data (Samsugi dkk., 2022).



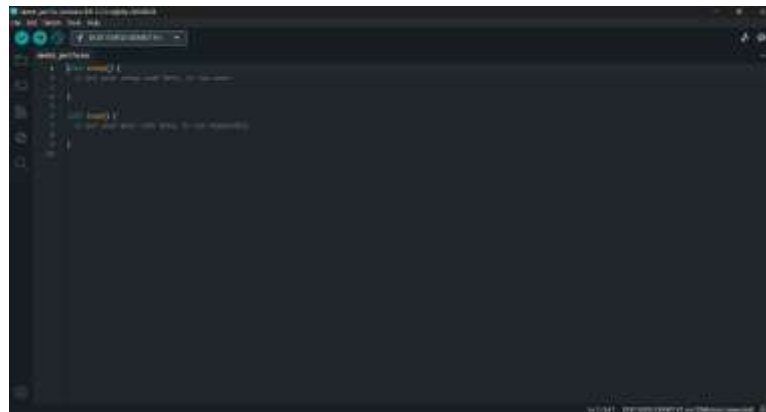
Gambar 2. 17 Modul RTC
Sumber : <https://www.google.com>

2.2.18 Arduino Ide

Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) adalah perangkat lunak yang dirancang untuk mempermudah pembuatan dan pengelolaan program pada berbagai jenis *board* Arduino. Dengan antarmuka yang mudah digunakan, Arduino IDE memungkinkan penggunaanya untuk menulis, mengedit, mengunggah, dan mengelola kode dengan efisien. Platform ini cocok digunakan oleh berbagai

kalangan, mulai dari pemula hingga profesional, yang ingin mengembangkan proyek mereka dengan mudah. Arduino IDE mendukung berbagai macam *board* Arduino, sehingga memberikan fleksibilitas dalam pengembangan perangkat keras.

Salah satu keunggulan utama dari Arduino IDE adalah penggunaan bahasa pemrograman Java, yang menawarkan stabilitas dan keandalan bagi pengguna. Selain itu, Arduino IDE juga menyediakan *library wiring C/C++* yang mempermudah pengoperasian *input* dan *output* pada *board* Arduino. Library ini menawarkan berbagai fungsi siap pakai, memungkinkan pengguna untuk lebih fokus pada logika dan fitur khusus proyek mereka tanpa perlu khawatir tentang detail teknis pemrograman tingkat rendah (G. N. E. Putra & Nulhakim, 2023).

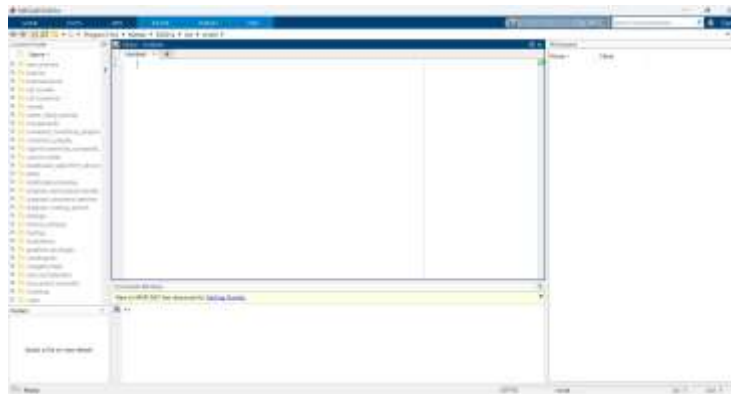


Gambar 2. 18 Arduino Ide
Sumber : www.bing.com

2.2.19 Matlab

MATLAB, yang merupakan singkatan dari Matrix Laboratory, adalah perangkat lunak serbaguna yang digunakan untuk analisis, komputasi teknis, matematika, dan pemrograman. Dirancang khusus untuk bekerja dengan matriks, MATLAB memungkinkan pengguna untuk memanipulasi data matriks secara efisien, menjadikannya alat yang sangat bermanfaat dalam berbagai aplikasi ilmiah dan teknik. Dengan antarmuka yang ramah pengguna dan bahasa pemrograman yang kuat, MATLAB ideal untuk perhitungan dan visualisasi data. Perangkat lunak ini banyak digunakan di berbagai bidang seperti fisika, kimia, biologi, ekonomi, dan teknik karena kemampuannya untuk melakukan perhitungan matematis dengan cepat dan akurat.

Dalam dunia pendidikan, MATLAB banyak digunakan untuk memfasilitasi pembelajaran pemrograman matematika, memungkinkan siswa dan peneliti menyelesaikan masalah matematika yang kompleks melalui simulasi dan pemodelan komputer. Di berbagai disiplin ilmu, seperti teknik dan sains, MATLAB digunakan untuk perhitungan rumit, termasuk analisis data, logika fuzzy, simulasi, optimasi, dan pengolahan gambar digital. Fitur logika fuzzy memungkinkan MATLAB bekerja dengan data yang tidak pasti atau ambigu, sementara simulasi memungkinkan pembuatan model sistem kompleks dan prediksi perilakunya. Optimasi membantu menemukan solusi terbaik untuk masalah dengan banyak variabel, dan pengolahan gambar digital memungkinkan analisis serta manipulasi gambar dengan teknik yang canggih. Semua fitur ini menjadikan MATLAB alat yang sangat berharga dalam penelitian dan pengembangan di berbagai bidang.



Gambar 2. 19 Matlab
Sumber :www.bing.com

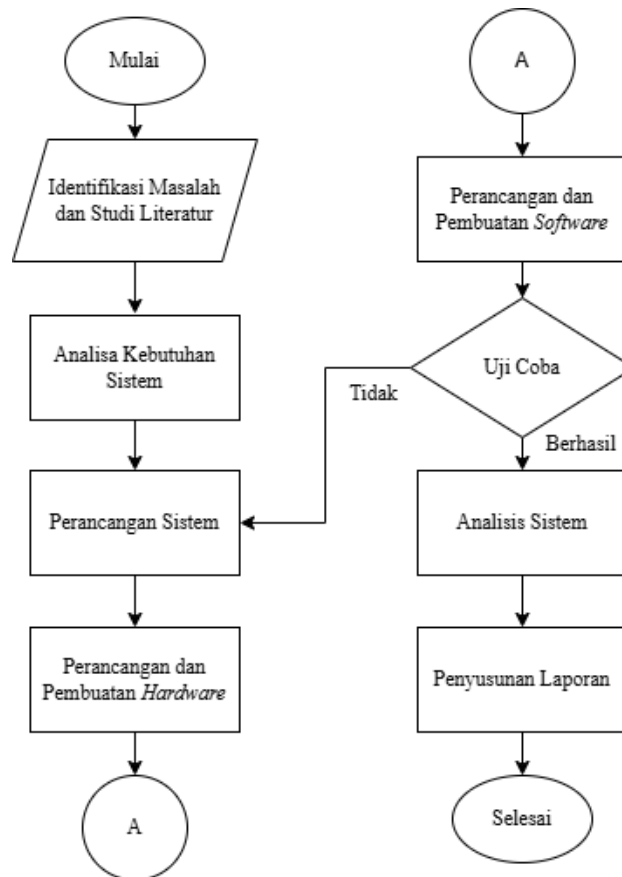
BAB 3

METODE PENELITIAN

Bab ini berisi tentang alur penelitian dari Tugas Akhir. Pembahasan pada bab ini adalah mengidentifikasi masalah, studi literatur, analisis kebutuhan sistem, perancangan *hardware* dan *software*, implementasi dan pengujian prototipe serta analisis dan pembahasan.

3.1 Tahapan Penelitian

Bab ini menjelaskan langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian. Penyusunan sistem dalam penelitian ini melalui beberapa tahap pengerjaan. Penelitian ini mencakup proses perancangan dan pengujian langsung dengan menggunakan prototipe, sehingga sesuai dengan karakteristik penelitian yang dilakukan. Metodologi penelitian disusun dalam bentuk diagram blok berikut.



Gambar 3. 1 Tahapan Penelitian
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

3.1.1 Identifikasi Masalah

Identifikasi masalah adalah tahap untuk menganalisis dan memahami permasalahan yang terjadi dalam HHO Generator. Pada tahap ini ditemukan kebutuhan akan optimasi sistem elektrolisis pada HHO Generator sebagai solusi. Dari hasil identifikasi tersebut, peneliti merumuskan judul “Optimasi Sistem Elektrolisis HHO Generator Menggunakan Kontrol PID untuk Meningkatkan Efisiensi Produksi Hidrogen” yang tujuannya untuk dapat meningkatkan efisiensi produksi gas hidrogen pada HHO Generator.

3.1.2 Studi Literatur

Studi literatur merupakan tahap penting dalam proses penelitian Tugas Akhir. Langkah ini bertujuan untuk memahami temuan sebelumnya yang relevan dengan topik yang diteliti serta cara para peneliti terdahulu menangani masalah serupa. Pada tahap ini, penulis perlu mencari referensi yang mendukung topik penelitian, seperti jurnal tentang kontrol PID atau buku yang membahas alat HHO Generator, yang mencakup hasil penelitian sebelumnya. Selain itu, penulis juga harus mempelajari datasheet komponen yang akan digunakan, karena informasi tersebut sangat penting sebagai acuan dalam memilih komponen elektronik yang tepat.

3.1.3 Analisa Kebutuhan Sistem

Analisis Kebutuhan Sistem merupakan tahap untuk mengidentifikasi dan menganalisis berbagai komponen yang diperlukan dalam pembuatan prototipe ini, di antaranya:

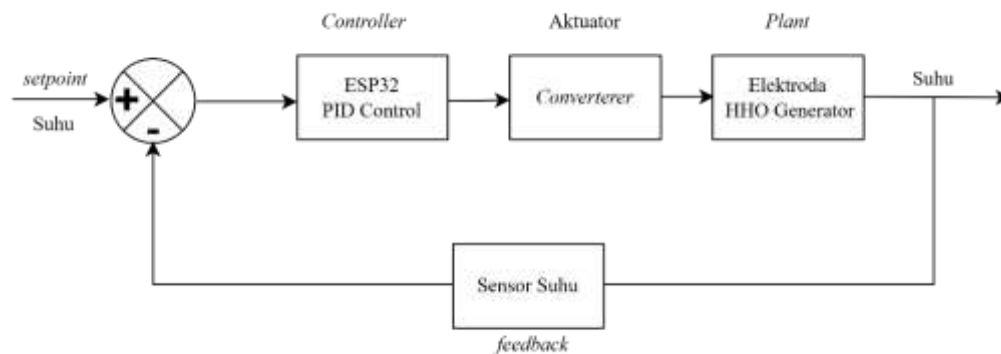
Tabel 2. 4 Kebutuhan Sistem

| No. | Kebutuhan <i>Hardware</i> | Kebutuhan <i>Software</i> |
|-----|-------------------------------------|---------------------------|
| 1. | Sensor <i>Temperature</i> RTD PT100 | Arduino.Ide |
| 2. | Sensor MICS-5524 | Matlab |
| 3. | Modul MAX31865 | |
| 4. | <i>Push Button</i> | |
| 5. | <i>Voltage</i> Sensor | |
| 6. | <i>Current</i> Sensor | |
| 7. | Modul RTC | |
| 8. | LCD | |
| 9. | DC <i>Fan</i> | |
| 10. | Relay | |
| 11. | <i>Driver</i> BTS7960 | |

| No. | Kebutuhan <i>Hardware</i> | Kebutuhan <i>Software</i> |
|-----|---------------------------|---------------------------|
| 12. | ESP32 | |
| 13. | <i>Power Supply</i> | |

3.2 Konsep Penelitian

Konsep penelitian ini digunakan sebagai acuan dan landasan bagi penulis untuk menyelesaikan penelitian tugas akhir ini. Fokus dari penelitian tugas akhir ini adalah implementasi PID untuk efisiensi produksi Hidrogen melalui kontrol suhu pada elektroda dalam proses elektrolisis.



Gambar 3. 2 Rancangan Diagram Blok Konsep Penelitian
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

Pada gambar diagram blok 3.2 Sistem yang ditampilkan adalah rangkaian kendali untuk mengoptimalkan proses elektrolisis pada HHO Generator. Proses ini bertujuan untuk menghasilkan gas hidrogen dan oksigen melalui pemecahan molekul air menggunakan elektroda. Komponen utama sistem ini adalah ESP32 yang berperan sebagai pengontrol berbasis PID (*Proportional-Integral-Derivative*), konverter untuk mengatur tegangan, elektroda sebagai tempat elektrolisis, dan sensor suhu yang memberikan feedback. Sistem ini dirancang agar suhu pada elektroda tetap terjaga dalam rentang optimal, sehingga proses elektrolisis berlangsung dengan efisiensi tinggi.

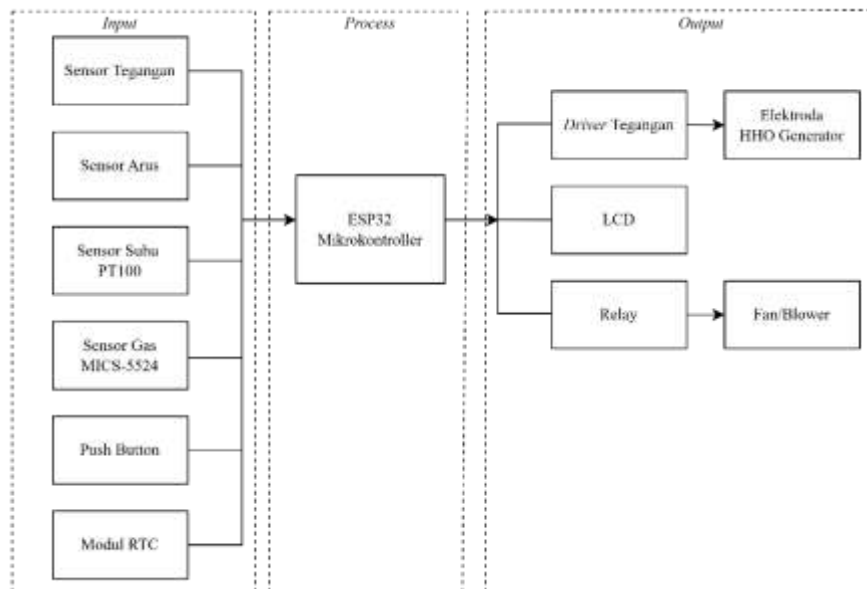
Kontrol PID digunakan untuk memastikan tegangan yang dialirkan ke elektroda sesuai kebutuhan, berdasarkan suhu yang diukur oleh sensor. Jika suhu tabung elektrolizer terlalu tinggi, PID akan menurunkan tegangan untuk mencegah energi terbuang dalam bentuk panas berlebih. Sebaliknya, jika suhu terlalu rendah, PID akan meningkatkan tegangan agar elektrolisis tetap berjalan efektif. Tegangan

yang dikendalikan oleh PID ini diatur menggunakan konverter , yang menerima sinyal kontrol dari ESP32 melalui sinyal PWM.

Tujuan utama sistem ini adalah menghasilkan gas hidrogen dengan menjaga suhu tabung elektrolizer tetap stabil, proses elektrolisis dapat berjalan efisien tanpa pemborosan energi atau kerusakan pada elektroda. Sistem ini juga fleksibel dan dapat diatur sesuai kebutuhan produksi, menjadikannya solusi yang optimal untuk penelitian atau aplikasi terkait hidrogen.

3.2.1 Prinsip Kerja Sistem

Prinsip kerja sistem ini mewakili gambaran umum sistem yang akan dibangun. Berikut adalah gambar blok diagram sistem.



Gambar 3. 3 Rancangan Diagram Blok Sistem
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

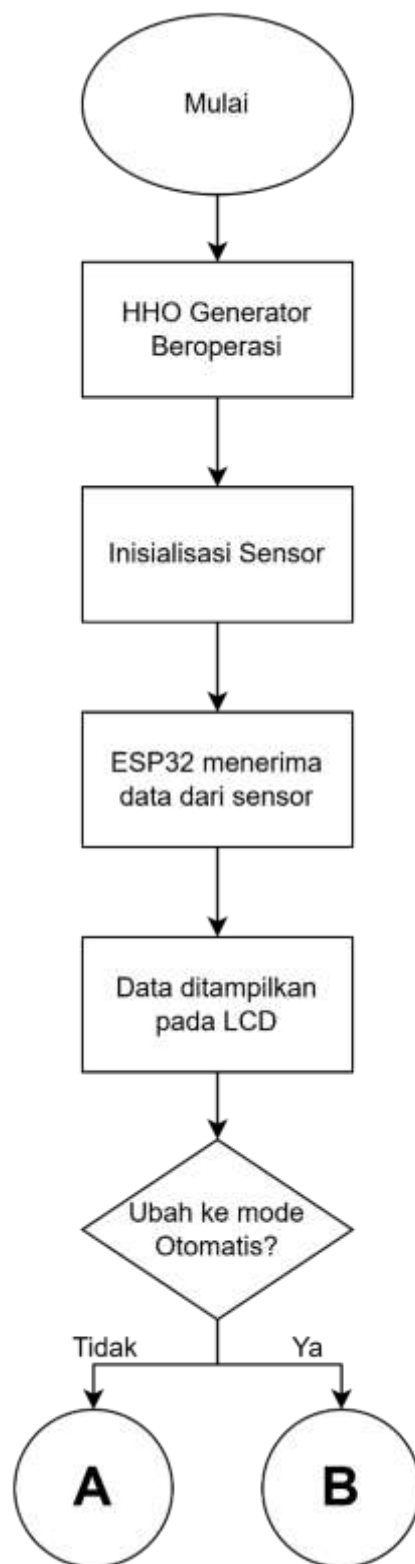
Pada Gambar 3.3 Diagram Blok Sistem menunjukkan alur kerja sistem yang terdiri dari tiga komponen utama: *input*, proses, dan *output*. Pada bagian *input*, sistem dilengkapi dengan berbagai sensor seperti sensor tegangan, arus, suhu, dan sensor gas hidrogen (MICS-5524). Sensor-sensor ini berfungsi untuk mendeteksi dan mengukur parameter penting selama proses berlangsung, seperti tegangan yang diberikan, arus listrik yang mengalir, suhu tabung elektrolizer, dan konsentrasi hidrogen yang dihasilkan. Data dari sensor-sensor ini dikirimkan ke mikrokontroler

ESP32, yang bertindak sebagai pusat pengendali sistem. Pada tahap proses, ESP32 menjalankan algoritma PID (*Proportional-Integral-Derivative*) untuk memastikan parameter-parameter yang terukur tetap berada dalam rentang yang telah ditentukan. Mikrokontroler kemudian mengatur perangkat-perangkat *output* seperti konverter untuk menyesuaikan tegangan, serta menampilkan informasi proses melalui modul LCD.

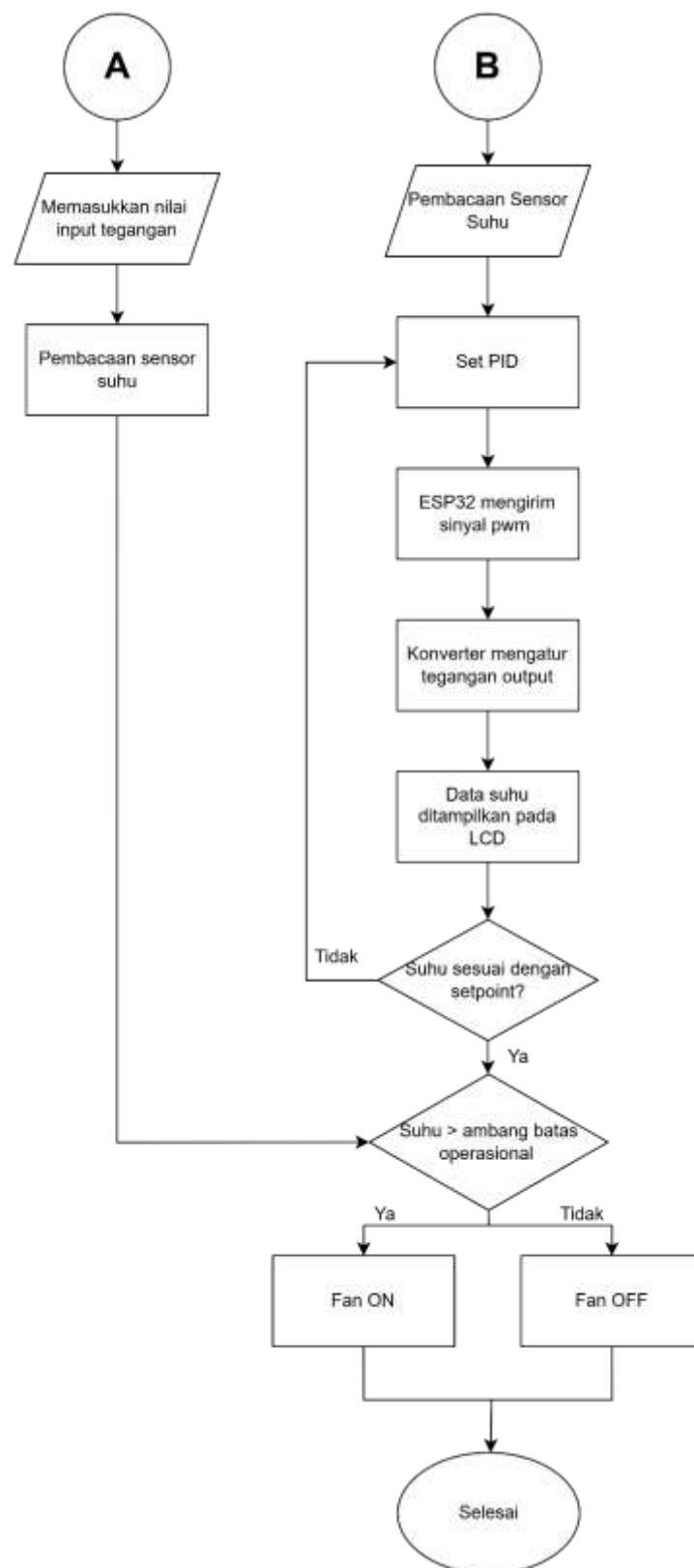
Prinsip kerja sistem ini dimulai dari pengukuran parameter oleh sensor pada bagian *input*. Data yang diperoleh dianalisis oleh ESP32 di tahap proses, di mana algoritma PID menghitung nilai koreksi yang diperlukan untuk menjaga agar parameter sesuai dengan *setpoint*, seperti menjaga suhu tabung elektrolizer dalam rentang optimal. Hasil pengolahan dari mikrokontroler diterapkan pada bagian *output*, misalnya dengan mengatur tegangan melalui konverter untuk memastikan elektrolisis berjalan efisien. Sistem juga menggunakan kipas/*blower* untuk menjaga suhu agar tidak melebihi batas yang diinginkan dan menampilkan informasi penting seperti status sistem pada LCD. Dengan pendekatan ini, sistem dapat beroperasi secara terkontrol, efisien, dan sesuai tujuan penelitian untuk menghasilkan hidrogen secara optimal.

Berikutnya merupakan rancangan alur kerja sistem atau flowchart di bawah ini menjelaskan alur kerja sistem secara keseluruhan, mulai dari pengoperasian generator HHO hingga penyesuaian mode kerja sistem. Tahapan-tahapan ini dirancang untuk memastikan setiap proses berjalan secara sistematis dan terstruktur. Sistem dimulai dengan mengaktifkan generator HHO sebagai sumber utama produksi gas hidrogen dan oksigen, diikuti oleh inisialisasi sensor yang bertugas membaca parameter.

Setelah sensor aktif, data yang diperoleh dikirimkan ke mikrokontroler ESP32 untuk diproses. Informasi hasil pemrosesan kemudian ditampilkan pada layar LCD untuk memudahkan pemantauan oleh pengguna. Pada tahap ini, pengguna memiliki opsi untuk mengubah mode kerja sistem. Jika mode otomatis dipilih, sistem akan melakukan penyesuaian parameter secara mandiri berdasarkan data yang diterima. Sebaliknya, jika mode manual tetap dipertahankan, pengguna akan melakukan pengendalian secara langsung sesuai kebutuhan.



Gambar 3. 4 Rancangan Alur Kerja Sistem 1
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis



Gambar 3. 5 Rancangan Alur Kerja Sistem 2
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

Pada gambar 3.4 menunjukkan rancangan alur kerja sistem pada HHO Generator. Setelah alat dinyalakan dan HHO Generator beroperasi maka sensor-sensor yang terdapat pada alat akan mulai aktif dan mengirimkan data pada ESP32. Setelah data diterima oleh ESP32 data akan ditampilkan sebagai informasi pada LCD. Pada rancangan sistem ini terdapat dua sistem, yang pertama adalah dengan mode manual (A) dan yang kedua mode otomatis atau PID (B).

Pada gambar 3.5 rancangan alur kerja sistem untuk mode manual (A) dan mode otomatis (B). Pada mode manual tegangan *input* pada HHO Generator diatur secara manual dengan memasukkan nilai tegangannya pada konverter. Pada kondisi ini sensor suhu digunakan untuk mendeteksi suhu pada elektroda. Apabila suhu melebihi ambang batas aman maka kipas akan menyala.

Pada mode otomatis (B) nilai suhu dapat diatur menjadi nilai yang diinginkan. Dengan pembacaan nilai awal suhu dan penyesuaian nilai Error untuk memproses PID. Setelah itu, ESP32 mengirim sinyal *pwm* pada konverter untuk menyesuaikan tegangan *output* pada Elektroda. *Output* tegangan dikontrol untuk mempengaruhi suhu yang dihasilkan. Apabila suhu sudah sesuai dengan yang diinginkan maka data akan ditampilkan pada LCD. Apabila suhu melebihi batas ambang operasional kipas akan menyala.

3.3 Perencanaan dan Desain

Pada bab ini berisikan penjelasan tentang perencanaan dari sistem yang akan dibuat pada Tugas Akhir nantinya.

3.3.1 Perancangan *software*

Perancangan *software* dibuat guna menunjang kinerja sistem yang akan dibuat.

3.3.1.1 Perancangan Kontrol PD

Pada perancangan Kontrol PD, pengaturan nilai P dan D perlu dilakukan agar sinyal *output* sistem dapat mencapai *setpoint* yang telah ditentukan. Konstanta P (*proportional*) digunakan untuk mendapatkan *rise time* yang cepat kontrol proporsional sebagai berikut:

$$P = error * kp \quad (3.1)$$

Dimana :

P = Kontrol *Proportional*

Kp = Konstanta *Proportional*

error = Sinyal *error* terakhir

Dikarenakan sistem menggunakan kontrol *proportional* maka sistem akan mendapatkan *rise time* yang tinggi tetapi sistem akan mengalami *overshoot* apabila Kp tidak tepat. Maka digunakan kontrol D (*Derivative*) untuk meminimalkan *overshoot* yang ditimbulkan oleh kontrol *proportional*. Penerapan kontrol *derivative* pada sistem ini sebagai berikut:

$$lastError = error \quad (3.1)$$

$$D = (error - lastError) * \frac{kd}{\Delta error} \quad (3.2)$$

Dimana :

D = Kontrol *Derivative*

Error = Sinyal *error* saat ini (*realtime*)

lastError = Sinyal *error* terakhir

Kemudian dari kontrol P pada persamaan (3.1) dan kontrol D (3.3) ditambahkan untuk mendapatkan nilai PD. Sehingga penerapan rumus pada sistem ini sebagai berikut:

$$PD = P + D \quad (3.4)$$

Dengan menggunakan nilai konstanta PD, diharapkan sistem pada kestabilan suhu pada saat mencapai *setpoint* dapat bekerja dengan stabil.

3.3.1.2 Tuning PID dengan algoritma *Ziegler Nichols 1*

Pada kontrol PID, dibutuhkan konstanta pengali yang disebut Gain, yang sangat penting untuk memastikan respon sistem sesuai dengan kontrol yang diterapkan. Ada beberapa metode untuk menentukan nilai Gain pada kontrol PID, salah satunya adalah metode Ziegler-Nichols. Metode ini digunakan ketika sistem tidak memiliki model matematis yang jelas atau sulit mendapatkan model sistem yang akurat. Metode Ziegler-Nichols sendiri terbagi menjadi dua, yaitu metode pertama dan metode kedua. Dalam tugas akhir ini, yang akan diterapkan adalah

metode pertama. Untuk menentukan nilai K_p , K_i , dan K_d dalam metode pertama, dibutuhkan dua parameter, yaitu L dan T . Kedua parameter ini diperoleh melalui grafik respon sistem, dengan cara menggambar garis singgung pada sumbu x dan y untuk menentukan titik infleksi pada kurva S (Putri dkk., 2022). Persamaan untuk menghitung K_p , K_i , dan K_d berdasarkan nilai L dan T dapat dilihat pada Tabel berikut:

Tabel 3. 1 Parameter *Ziegler Nichols* 1

| Pengendali | K_p | T_i | T_d |
|------------|----------|----------|--------|
| P | T/L | ∞ | 0 |
| PI | $0,9T/L$ | $L/0,3$ | 0 |
| PID | $1,2T/L$ | $2L$ | $0,5L$ |

Sumber : (Putri dkk., 2022)

Pada tabel parameter PID *Ziegler-Nichols* 1. Dibuat dengan menggunakan sistem *close loop*. Respon *close loop* didapatkan dengan mendapatkan nilai ' K_p ', ' T_i ', ' T_d ', ' K_i ' dan dengan menggunakan persamaan (3.5) berikut :

$$K_p = 1,2.T/L$$

$$T_i = 2L$$

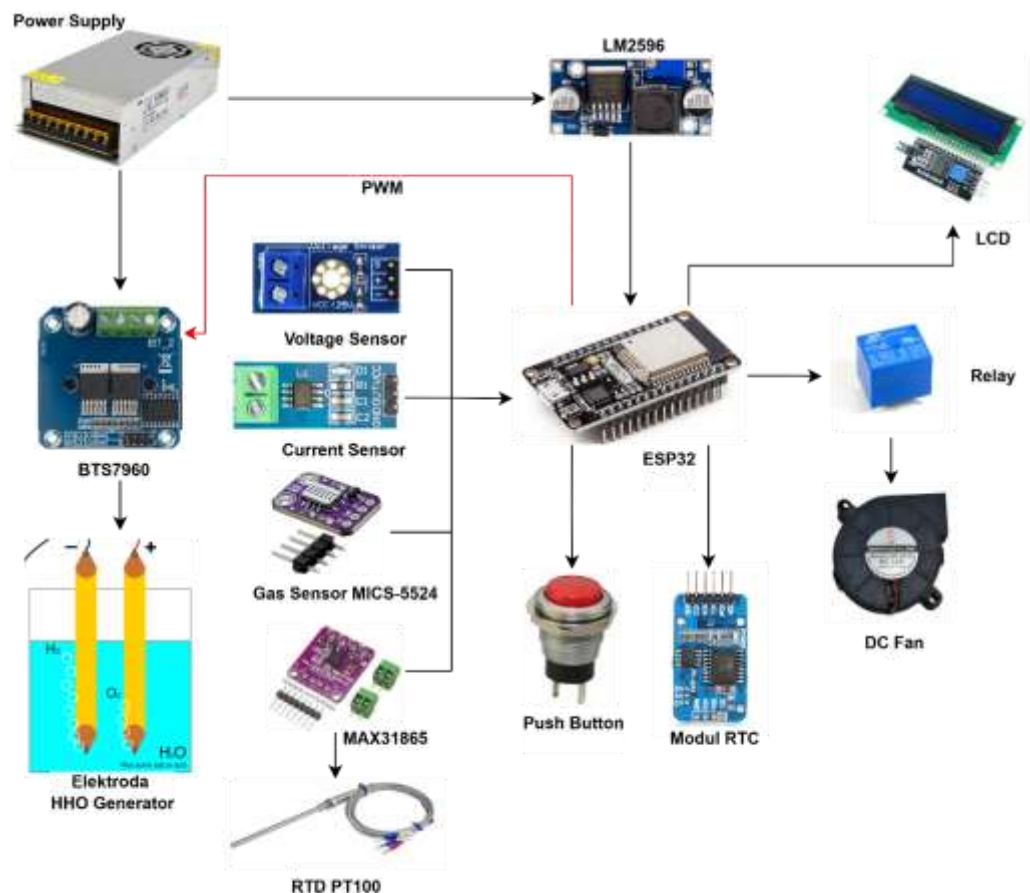
$$T_d = 0,5.L$$

$$K_i = K_p/T_i$$

$$K_d = K_p \times T_d$$

3.3.2 Perancangan *Hardware*

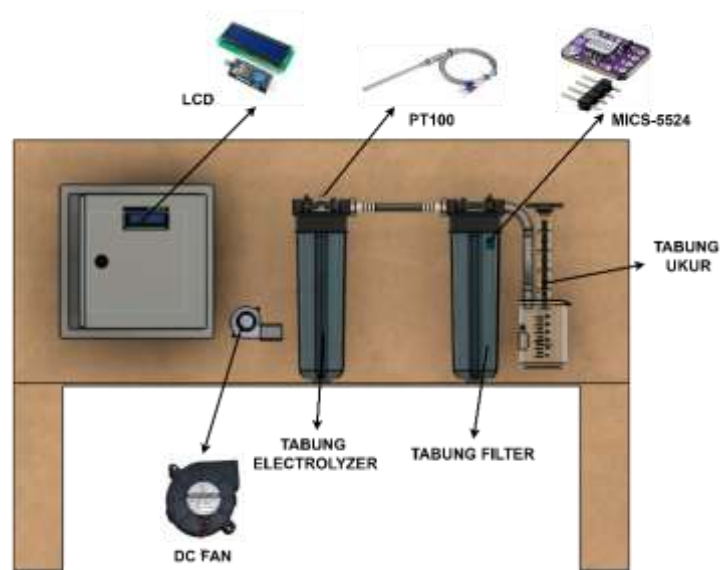
Pada subbab ini, fokus akan diberikan pada perancangan *hardware* elektrik yang mendasari keseluruhan sistem. Perancangan ini mencakup pemilihan dan pengintegrasian berbagai komponen yang bekerja bersama-sama untuk menjalankan fungsi yang diinginkan. Setiap komponen dalam sistem memiliki peran yang sangat penting, mulai dari penyediaan daya hingga pengolahan data dan kontrol perangkat.



Gambar 3. 6 Perancangan *Hardware*
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

Pada Gambar 3.6 merupakan prinsip kerja dari istem perancangan *hardware*. Keluaran DC 24V dari *power supply* digunakan untuk sumber tegangan utama yang terbagi akan kebutuhan pada sumber tegangan elektroda pada HHO Generator dan ESP32. Tegangan pada ESP32 dikonversi melalui konverter LM2596 dari 24V menjadi 5V dan tegangan pada elektroda HHO Generator dikontrol dengan konverter yang terhubung pada pin *pwm* ESP32. Tegangan 5V juga digunakan pada sensor tegangan, arus, MICS-5524, dan MAX31865.

3.3.3 Perancangan *Hardware* Prototipe



Gambar 3. 7 Perancangan *Hardware* Prototipe
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

Tahap berikutnya dalam Tugas Akhir ini adalah proses perancangan perangkat keras. Pada tahap ini, semua komponen perangkat keras lunak fusion 360 dari Autodesk. Perancangan ini bertujuan untuk mempermudah penelitian dalam membangun alat yang akan digunakan selama penelitian. Tampilan dari desain *hardware* dapat dilihat pada Gambar 3.7.

1. Panel yang digunakan untuk pemasangan beberapa komponen elektronika seperti *power supply* dan pcb nantinya
2. Pada box panel juga terdapat layar LCD yang digunakan untuk tampilan informasi dari sensor
3. Selang yang dilengkapi dengan *nipple* digunakan untuk menyambungkan antara tabung *electrolyzer* dan tabung filter
4. Kipas yang digunakan untuk menurunkan suhu pada eektroda apabila melebihi ambang batas operasional
5. Tabung *electrolyzer* digunakan untuk tempat terjadinya proses elektrolisis
6. Tabung filter digunakan untuk memisahkan atau menyaring hidrogen dan oksigen dengan memanfaatkan air didalam tabung
7. Gelas ukur yang digunakan untuk menampung gas yang dihasilkan daari HHO generator

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

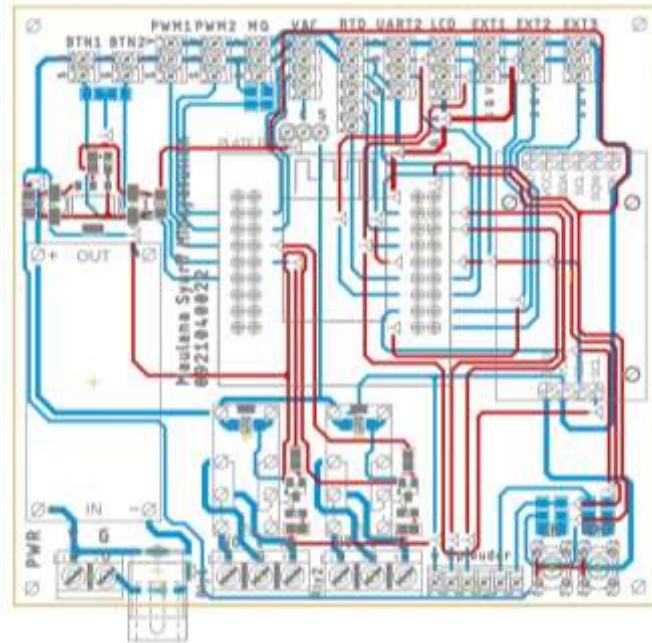
Pada bab ini membahas hasil dari pengujian tugas akhir beserta analisisnya. Pengujian dilakukan dalam beberapa bagian seperti pengujian *hardware*, pengujian *Software*, serta pengujian sistem. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa Seluruh sistem yang terdapat pada tugas akhir ini mampu berjalan dengan baik Sesuai dengan perencanaan sebelumnya.

4.1 Hasil Perancangan *Hardware*

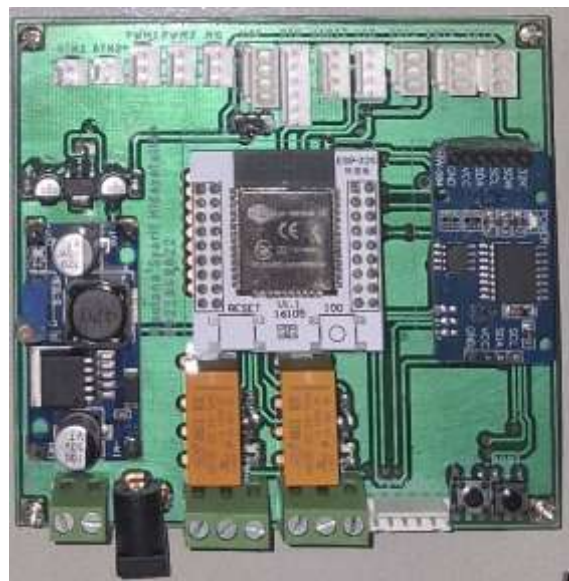
Perancangan *hardware* meliputi pemilihan dan penyusunan komponen seperti sensor dan aktuator yang sesuai dengan kebutuhan sistem. Sensor berfungsi sebagai *input* untuk mendeteksi kondisi tertentu, sementara aktuator bertindak sebagai *output* untuk menjalankan respon sistem. Semua komponen dirancang agar terintegrasi dengan baik dan mendukung kinerja sistem secara keseluruhan.

4.1.1 Perancangan *Hardware* Mikrokontroller ESP32

Mikrokontroller pada penelitian ini menggunakan *printed circuit board* atau PCB berbasis ESP32 yang dicetak dengan mandiri oleh peneliti dan dirangkai dengan menggunakan *software* Eagle. Pada tahapan pembuatan PCB dimulai dari menentukan *input* dan *output* dari pin yang tersedia pada ESP32. Setelah menentukan *input* dan *output* dari pin ESP32, peneliti membuat skematik rangkaian menggunakan *software* Eagle dengan menambahkan komponen-komponen yang dibutuhkan. Selanjutnya, skematik tersebut diubah menjadi layout PCB dengan mengatur posisi komponen dan membuat jalur koneksi antar pin (*routing*). Setelah pengecekan desain menggunakan fitur *Electrical Rule Check (ERC)* dan *Design Rule Check (DRC)* untuk memastikan tidak ada kesalahan sambungan atau desain, hasil desain kemudian diekspor dalam bentuk file Gerber. File tersebut digunakan sebagai referensi dalam proses pencetakan PCB secara mandiri. Berikut merupakan gambar *board* PCB berbasis ESP32 yang telah dibuat oleh peneliti sebelum dicetak dan hasil setelah dicetak :



Gambar 4. 1 Desain *Board* PCB
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis



Gambar 4. 2 Hasil Cetak *Board* PCB
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

4.1.2 Hasil Perancangan Panel

Pada tahap ini perancangan panel menggunakan ukuran 40x30x18 cm. Dengan komponen di dalamnya ada *Power Supply* 24 V 10 A, Mikrokontroler, MCB, *Driver* BTS7960, Sensor Tegangan, Sensor Arus, Modul MAX31865, LCD,

Push Button hijau, Terminal Block 12 pin, dan kabel duck untuk menjaga kerapian wiring.



Gambar 4. 3 Panel Tampak Luar
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis



Gambar 4. 4 Panel Tampak Dalam
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

4.1.3 Hasil Perancangan Mekanik

Pada tahap ini perancangan mekanik diawali dengan pembuatan meja dengan luas alas meja berukuran 100x50 cm. Tebal dari kayu yang digunakan untuk alas meja menggunakan ukuran 9mm. Tinggi dari kaki-kaki meja menggunakan

ukuran 25 cm. Meja pada penelitian ini digunakan sebagai tempat untuk alat pengujian dan panel. Berikut gambar meja yang telah dibuat oleh peneliti pada gambar 4.5.



Gambar 4. 5 Meja Penelitian
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

Setelah pembuatan meja dilakukan perancangan alat HHO Generator, seperti yang telah direncanakan peneliti menggunakan 2 tabung filter air berukuran 10 inch. Dimana pada tabung pertama berfungsi sebagai tabung elektrolizer dan tabung kedua berfungsi sebagai tabung filtrasi udara. Tabung dapat dilihat pada gambar 4.6 di bawah ini. Pada tabung elektrolizer sudah terdapat elektroda yang tersusun dan *wire* yang sudah terhubung pada anoda dan katoda. Selain itu, pada tabung elektrolizer juga ada sensor suhu PT100.



Gambar 4. 6 Tabung Elektrolizer dan Tabung Filter
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

Untuk gambar keseluruhan dari tahapan pengerjaan mekanik dapat dilihat dari gambar 4.7 di bawah ini.



Gambar 4. 7 Tahap Perancangan Mekanik
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

4.2 Hasil Pengujian Sensor dan Aktuator

Pengujian *hardware* pada tahap ini mencakup pengujian kinerja sensor dan aktuator yang digunakan dalam Tugas Akhir. Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil sensor dengan alat ukur pembanding untuk menilai tingkat akurasi pembacaan. Selain itu, respon aktuator diamati secara langsung untuk memastikan apakah sudah beroperasi sesuai dengan fungsinya. Dari hasil pengujian ini, tingkat kesalahan atau error dapat dihitung, sehingga diperoleh nilai persentase error yang menjadi acuan dalam menilai keandalan sistem secara keseluruhan. Untuk mengetahui besarnya kesalahan pada setiap percobaan, hasil pengujian dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

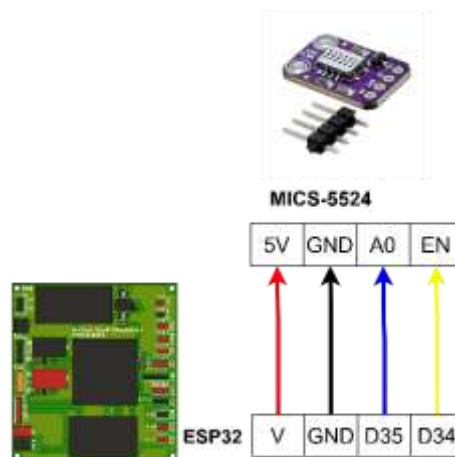
$$Error \% = \frac{Pengujian-Data}{Pengujian} \times 100 \quad (4.1)$$

4.2.1 Hasil Perancangan Sensor MICS-5524

Sensor gas MiCS-5524 digunakan dalam sistem ini untuk mendeteksi keberadaan gas tertentu di lingkungan sekitar, seperti karbon monoksida, metana, atau hidrogen. Sensor ini memiliki empat pin utama, yaitu V (VCC), GND (Ground), A0 (Analog Output), dan EN (Enable). Pada proses *wiring* seperti ditunjukkan dalam rancangan, pin V dari sensor dihubungkan ke pin 3.3V atau 5V pada ESP32 (disesuaikan dengan kebutuhan sensor), sedangkan pin GND

disambungkan ke pin ground (GND) ESP32. Selanjutnya, pin A0 dari sensor, yang merupakan keluaran analog dari sensor, dihubungkan ke pin D35 (GPIO35) pada ESP32, yang mendukung pembacaan sinyal analog. Terakhir, pin EN dihubungkan ke pin D34 (GPIO34) sebagai kontrol aktivasi sensor melalui program mikrokontroler.

Konfigurasi ini memungkinkan mikrokontroler ESP32 untuk membaca tingkat konsentrasi gas dari sinyal analog melalui pin D35, serta mengaktifkan atau menonaktifkan fungsi sensor melalui pin D34. Dengan demikian, sistem dapat secara efisien memantau kualitas udara dan merespons sesuai dengan ambang batas yang telah ditentukan dalam perangkat lunak.



Gambar 4. 8 *Wiring* MICS-5524
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

Pada pengujian sensor gas MICS-5524 ini menggunakan alat pengukur berupa MSA Gas Detector, yang dapat mendeteksi Gas CO dan NH₃. Dimana pada pengujian ini dilakukan hanya pada gas CO. Terdapat beberapa tahapan untuk melakukan kalibrasi sensor MICS-5524. Pada saat melakukan pengambilan data dilakukan perhitungan nilai resistansi sensor pada saat terpapar gas (R_s) dan rasio resistansi saat pengujian dibanding nilai referensi di udara bersih (R_o).

Berikut adalah tabel yang menunjukkan hasil pengukuran dari sensor MICS-5524 dan alat ukur gas detector.

Tabel 4. 1 Hasil Percobaan Sensor MICS-5524

| Waktu (menit) | Sensor MICS-5524 | MSA Gas Detector | Errorr (%) |
|---------------|------------------|------------------|------------|
| 1 | 10.6 ppm | 11 ppm | 3.64 |
| 2 | 10.7 ppm | 11 ppm | 2.73 |
| 3 | 10.8 ppm | 11 ppm | 1.82 |
| 4 | 11.5 ppm | 12 ppm | 4.17 |

| Waktu (menit) | Sensor MICS-5524 | MSA Gas Detector | Errorr (%) |
|---------------|------------------|------------------|------------|
| 5 | 11.7 ppm | 12 ppm | 2.5 |
| 6 | 11.9 ppm | 12 ppm | 0.83 |
| 7 | 10.7 ppm | 11 ppm | 2.73 |
| 8 | 10.9 ppm | 11 ppm | 0.91 |
| 9 | 11.2 ppm | 11 ppm | 1.82 |
| 10 | 11.1 ppm | 11 ppm | 0.91 |

Berdasarkan tabel diatas peneliti menggunakan waktu selama 10 menit untuk melakukan pengujian sensor. Terdapat error dengan nilai rata-rata 2,20% dari hasil pengujian antara pembacaan sensor MICS-5524 dan MSA Gas Detector, hal ini dikarenakan pada sensor MICS-5524 memerlukan waktu lebih lama untuk dapat membaca gas dengan stabil dan akurat. Perlu diketahui juga, bahwa sebelum melakukan pengujian sensor MICS-5524 telah dilakukan pre-conditioning terlebih dulu agar sensor dapat lebih akurat dan stabil saat dilakukan pengujian. Pengujian sensor MICS-5524 beserta MSA gas detector dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



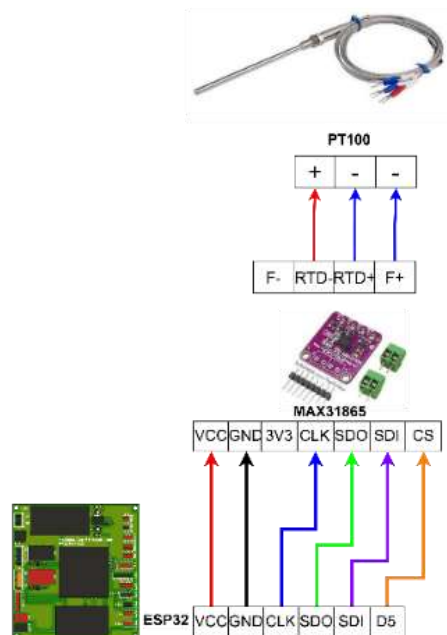
Gambar 4. 9 Pengujian Sensor Gas MICS-5524
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

4.2.2 Hasil Perancangan Sensor Temperature PT100

Sensor suhu PT100 digunakan sebagai sensor temperatur presisi tinggi dalam sistem ini, yang memanfaatkan prinsip perubahan resistansi terhadap suhu. Untuk mengolah sinyal dari PT100, digunakan modul konversi MAX31865 yang mengubah sinyal resistif dari PT100 menjadi sinyal digital melalui komunikasi SPI. Sensor PT100 memiliki empat kabel (dua untuk F+ dan F-, dua untuk RTD+ dan

RTD–), yang masing-masing dihubungkan ke terminal yang sesuai pada modul MAX31865. F+ dan RTD+ disambungkan ke terminal positif, sementara F– dan RTD– ke terminal negatif sesuai polaritas yang ditentukan.

Modul MAX31865 selanjutnya dihubungkan ke ESP32 melalui antarmuka SPI (Serial Peripheral Interface). Pin VCC pada MAX31865 terhubung ke pin 3.3V ESP32 untuk suplai daya, dan GND ke pin ground ESP32. Sinyal SPI terdiri dari empat jalur utama: CLK (*Clock*) dihubungkan ke pin D18, SDO (*Serial Data Out*) ke pin D19, SDI (*Serial Data In*) ke pin D23, dan CS (*Chip Select*) ke pin D5. Dengan konfigurasi ini, ESP32 dapat secara berkala membaca data suhu digital dari MAX31865 dengan akurasi tinggi.



Gambar 4. 10 *Wiring* MAX31865 dan PT100
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

Konfigurasi *wiring* ini memungkinkan sistem untuk melakukan pembacaan suhu dari sensor PT100 dengan keandalan tinggi, cocok untuk aplikasi industri atau sistem monitoring suhu yang presisi. Hasil pengujian pada sensor suhu PT100 dibandingkan dengan alat ukur termometer dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4. 2 Pengujian sensor suhu PT100 dengan termometer

| No. | Sensor PT100 (°C) | Termometer (°C) | Error (%) |
|-----|-------------------|-----------------|-----------|
| 1 | 30.14 | 31.4 | 4.01 |
| 2 | 30.42 | 31.5 | 3.43 |

| No. | Sensor PT100 (°C) | Termometer (°C) | Error (%) |
|-----|-------------------|-----------------|-----------|
| 3 | 30.86 | 31.5 | 2.03 |
| 4 | 30.91 | 31.4 | 1.56 |
| 5 | 30.95 | 31.4 | 1.43 |
| 6 | 30.96 | 31.4 | 1.41 |
| 7 | 30.99 | 31.4 | 1.28 |
| 8 | 30.99 | 31.5 | 1.59 |
| 9 | 31.2 | 31.4 | 0.64 |
| 10 | 31.1 | 31.4 | 0.95 |

Hasil pengujian sensor suhu PT100 dapat dilihat pada gambar 4.11 di bawah ini :



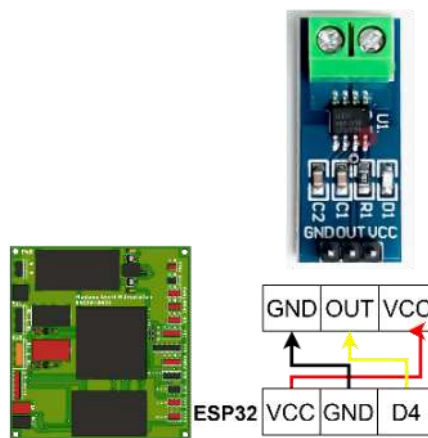
Gambar 4. 11 Pengujian sensor PT100
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

Pengujian sensor suhu ini dilakukan pada ruangan terbuka, sehingga nilai suhu pada termometer menggunakan suhu ruangan dan stabil pada kisaran 31,4 – 31,5°C. Sensor PT100 memerlukan waktu dalam penyesuaian suhu dan pada pengujian ini terdapat error antara pembacaan pada sensor PT100 dan alat ukur termometer dengan rata-rata error 1.84%. Dari nilai error tersebut dapat disimpulkan bahwa nilai keakuratan dari sensor pt100 ini memiliki nilai error berkisar 1-7% dimana hal tersebut dapat dikategorikan baik untuk pengujian sensor suhu. (Priambudi & Kurniawan, 2021).

4.2.3 Hasil Perancangan Sensor Arus

Untuk mengintegrasikan sensor arus ACS dengan ESP32, terdapat tiga koneksi utama yang perlu dilakukan: pin VCC pada sensor dihubungkan ke pin VCC ESP32 (dengan tegangan 5V sesuai spesifikasi ACS712) guna menyediakan daya, pin GND sensor dikoneksikan ke pin GND ESP32 untuk keperluan pembumian, dan pin OUT sensor disambungkan ke pin D4 ESP32 untuk mengirimkan sinyal analog yang merepresentasikan arus terdeteksi, yang

selanjutnya dibaca melalui ADC (Analog to Digital Converter) ESP32 sebagai *input* analog. Dengan konfigurasi pengkabelan yang akurat dan tegangan yang sesuai, sensor dapat mengirimkan data arus ke ESP32 untuk diolah lebih lanjut, dengan syarat sambungan kabel harus dipastikan baik guna menghindari kesalahan pembacaan sinyal atau pengukuran. Penting pula untuk memverifikasi spesifikasi arus maksimum yang dapat diukur oleh sensor agar tidak melebihi kapasitasnya. Pengujian awal sistem ini dapat dilakukan dengan memberikan arus kecil untuk memastikan bahwa hasil pembacaan sensor sesuai dengan nilai yang diharapkan.



Gambar 4. 12 *Wiring* sensor arus
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

Hasil pengujian sensor arus ACS712 20A ada pada tabel dibawah ini :

Tabel 4. 3 Pengujian Sensor Arus

| No. | Sensor ACS712 (mA) | Avometer (mA) | Error (%) |
|-----|--------------------|---------------|-----------|
| 1 | 0.0508 | 0.0508 | 0.00 |
| 2 | 0.0508 | 0.0508 | 0.00 |
| 3 | 0.0507 | 0.0508 | 0.20 |
| 4 | 0.0507 | 0.0508 | 0.20 |
| 5 | 0.0508 | 0.0508 | 0.00 |
| 6 | 0.0508 | 0.0509 | 0.20 |
| 7 | 0.0509 | 0.0509 | 0.00 |
| 8 | 0.0509 | 0.0509 | 0.00 |
| 9 | 0.0510 | 0.0509 | 0.20 |
| 10 | 0.0509 | 0.0509 | 0.00 |

Tabel di atas menunjukkan hasil perbandingan pembacaan arus antara sensor ACS712 dan avometer sebagai alat ukur referensi dalam satuan miliampere

(mA). Berdasarkan perhitungan menggunakan rumus persentase error, diperoleh nilai error yang sangat kecil dan konsisten, yaitu berkisar antara 0% hingga 0,2%, yang menunjukkan bahwa hasil pembacaan sensor ACS712 sudah cukup akurat dan mendekati nilai aktual. Tingkat kesalahan yang rendah ini mengindikasikan bahwa performa sensor dalam mendeteksi arus berada dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk kebutuhan penelitian. Pada pengujian ini error yang tingkat keakurasian sensor dapat lebih dari 97% yang artinya sensor ini sudah baik dan dapat digunakan dalam penelitian (Alviero & Setiawan Nugroho, 2023).

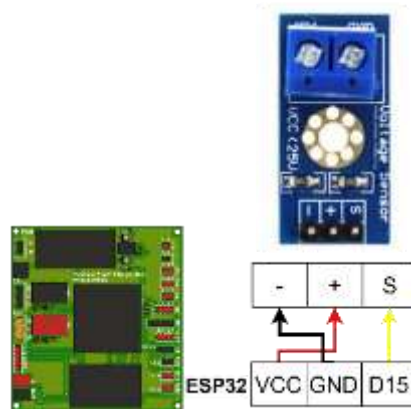


Gambar 4. 13 Pengujian Sensor Arus
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

4.2.4 Hasil Perancangan Sensor Tegangan

Pada sistem ini, sensor tegangan dihubungkan ke ESP32 menggunakan tiga koneksi utama, yaitu VCC, GND, dan S. Pertama, kabel VCC sensor dihubungkan ke pin VCC pada ESP32 untuk menyediakan sumber daya bagi sensor. Pastikan tegangan yang digunakan sesuai dengan kebutuhan sensor, yang biasanya 3.3V atau 5V, agar sensor dapat beroperasi dengan baik tanpa merusak komponen. Kedua, kabel GND sensor dihubungkan ke pin GND pada ESP32 sebagai pembumian atau ground. Koneksi GND yang baik antara sensor dan ESP32 sangat penting untuk kestabilan sistem secara keseluruhan. Terakhir, pin S pada sensor digunakan untuk mengirimkan sinyal yang diukur oleh sensor, dan kabel ini dihubungkan ke pin D15 pada ESP32. Pin D15 pada ESP32 berfungsi sebagai *input* untuk menerima sinyal dari sensor, yang bisa berupa sinyal analog atau digital, tergantung pada jenis sensor yang digunakan. Jika sensor menghasilkan sinyal analog, pin D15 dapat dikonfigurasi untuk menerima *input* melalui ADC (*Analog to Digital Converter*).

Dengan *wiring* yang benar, sistem dapat membaca dan memproses data dari sensor untuk keperluan aplikasi lebih lanjut..



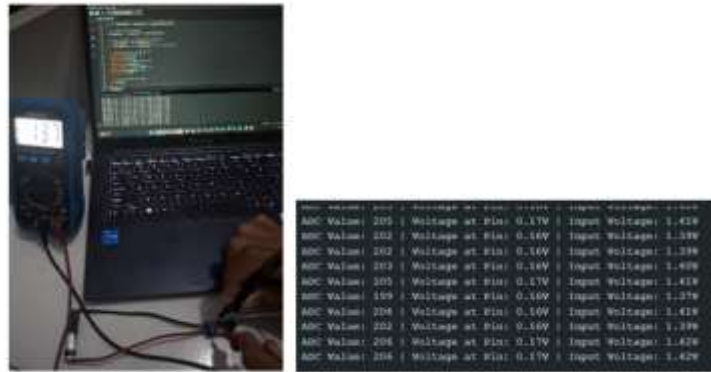
Gambar 4. 14 *Wiring* sensor tegangan
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

Hasil pengujian sensor tegangan dapat dilihat pada tabel dibawah ini :

Tabel 4. 4 Pengujian Sensor Tegangan

| No. | Sensor Tegangan (V) | Avometer (V) | Error (%) |
|-----|---------------------|--------------|-----------|
| 1 | 1.41 | 1.37 | 2.92 |
| 2 | 1.39 | 1.37 | 1.46 |
| 3 | 1.39 | 1.37 | 1.46 |
| 4 | 1.40 | 1.37 | 2.19 |
| 5 | 1.41 | 1.37 | 2.92 |
| 6 | 1.37 | 1.37 | 0 |
| 7 | 1.41 | 1.37 | 2.92 |
| 8 | 1.39 | 1.37 | 1.46 |
| 9 | 1.42 | 1.37 | 3.65 |
| 10 | 1.42 | 1.37 | 3.65 |

Tabel di atas menyajikan perhitungan error antara pembacaan sensor tegangan dan avometer sebagai referensi dalam satuan volt (V). Hasil menunjukkan error yang relatif kecil, dengan rata-rata error 2.26% yang menandakan bahwa sensor tegangan memiliki akurasi yang baik. Variasi ini dapat dipengaruhi oleh faktor seperti stabilitas sumber tegangan atau sensitivitas sensor, sehingga analisis ini menjadi dasar untuk memastikan reliabilitas data dalam penelitian, dengan potensi peningkatan melalui pengujian lebih lanjut atau optimasi perangkat. Untuk proses pengujian sensor tegangan terdapat pada gambar dibawah ini. Berdasarkan nilai error yang dihasilkan sensor tegangan untuk penelitian ini sudah dikategorikan baik dikarenakan kurang dari 5% (Fahruri dkk., 2021).



Gambar 4. 15 Pengujian Sensor Tegangan
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

4.2.5 Hasil Perancangan *Hardware Relay dan DC Fan*

Relay pada pin D27 berfungsi untuk mengendalikan aliran listrik yang berasal dari *Power Supply Unit* (PSU) 24V DC. Ketika pin D27 mengaktifkan relay, aliran listrik dari PSU dapat mengalir ke perangkat yang terhubung, seperti kipas (*fan*), yang digunakan dalam sistem pendingin atau aplikasi lainnya. Tiga terminal relay terdiri dari *Normally Open* (NO), *Common* (C), dan *Normally Closed* (NC), yang masing-masing mengatur hubungan aliran listrik berdasarkan kondisi relay, memungkinkan kontrol yang lebih fleksibel antara sumber daya dan perangkat yang beroperasi.

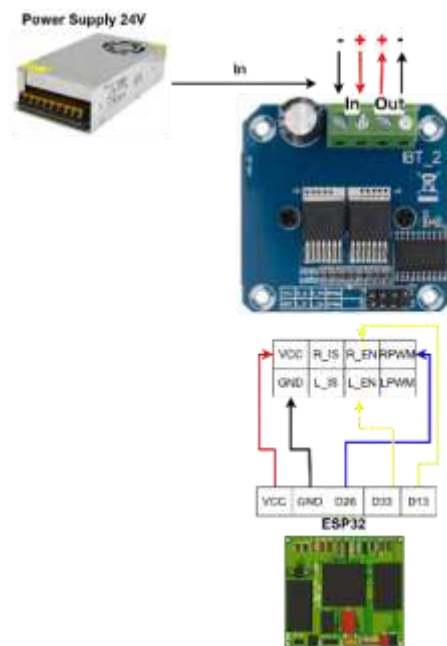


Gambar 4. 16 *Wiring* relay dan *fan*
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

4.2.6 Hasil Perancangan *Driver BTS7960*

Hasil *wiring* dan koneksi *driver* motor menggunakan modul IBT-2 yang dikendalikan oleh ESP32 menunjukkan hubungan yang jelas antara sumber daya

24V, modul *driver* IBT-2, dan ESP32 yang berfungsi untuk mengontrol dua saluran PWM, masing-masing untuk putaran kanan dan kiri. Diagram *wiring* ini menggambarkan penempatan pin seperti VCC, GND, serta pin kontrol R_EN, L_EN, RPWM, dan LPWM pada modul IBT-2 yang terhubung dengan pin-pin pada ESP32. Penataan komponen dan distribusi daya yang tepat memungkinkan aliran sinyal dan daya terkelola dengan baik, memastikan pengoperasian tegangan dapat berjalan efisien.



Gambar 4. 17 *Wiring* BTS7960
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

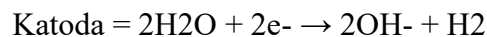
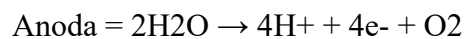
Pengujian *driver* BTS7960 menggunakan serial monitor pada *software* arduino.ide untuk menampilkan tegangan keluaran dari *driver* sesuai *input* pwm yang diinginkan dapat dilihat pada gambar dibawah ini :

```
PWM: 128 | Tegangan Keluaran: 12.05 V
Temperature: 33.79 °C
PWM: 128 | Tegangan Keluaran: 12.05 V
Temperature: 33.82 °C
PWM: 128 | Tegangan Keluaran: 12.05 V
Temperature: 33.79 °C
```

Gambar 4. 18 Pengujian *Driver* BTS7960
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

4.3 Pengujian HHO Generator

Prinsip kerja Hidrogen Generator berdasarkan pada elektrolisis air, yang berfungsi untuk memproduksi gas hidrogen. Elektrolisis adalah proses pemecahan senyawa air (H₂O) menjadi gas hidrogen (H₂) dan oksigen (O₂) dengan menggunakan arus listrik. Proses ini terjadi ketika arus listrik mengalir melalui larutan elektrolit dan menyebabkan reaksi kimia. Larutan elektrolit dapat menghantarkan listrik karena mengandung ion-ion yang dapat bergerak bebas, yang bertugas menghantarkan arus listrik. Proses hantaran listrik terjadi ketika sumber arus searah memberikan muatan yang berbeda pada kedua elektroda. Katoda, yang terhubung dengan kutub negatif, bermuatan negatif, sementara anoda, yang terhubung dengan kutub positif, bermuatan positif. Ion-ion tertentu dalam larutan akan menerima elektron dari katoda, sementara ion lainnya akan melepaskan elektron ke anoda. Elektron kemudian mengalir kembali ke katoda melalui sumber arus searah. Reaksi kimia yang terjadi selama elektrolisis adalah sebagai berikut:



Dari reaksi tersebut, dapat disimpulkan bahwa aliran arus listrik dalam elektrolisis menghasilkan gelembung gas hidrogen dan oksigen. Gelembung gas oksigen terbentuk di pelat positif (anoda), sementara gelembung gas hidrogen terbentuk di pelat negatif (katoda).

Pengujian elektrolisis menggunakan elektroda dengan muatan positif yang disebut anoda dan elektroda dengan muatan negatif yang disebut katoda. Dalam proses elektrolisis air, peneliti memilih *stainless steel* untuk anoda dan tembaga (Cu) untuk katoda. Berdasarkan penelitian terdahulu bahwa jenis anoda yang terbaik merupakan *stainless steel* 304. Sedangkan pemilihan bahan tembaga (Cu) pada katoda karena termasuk dalam bahan oksidator kuat dan diharapkan dapat lebih efektif menghasilkan produksi gas Hidrogen yang terbentuk pada reaksi kimia di bagian katoda. Adapun spesifikasi elektroda ditetapkan sama pada bagian anoda maupun katoda yakni berbentuk persegi panjang (15cm×4cm×2mm), jumlah plat pada anoda 6 dan pada katoda 6 sehingga jumlah elektroda 12 plat. Penggunaan listrik *input* menggunakan *Power Supply Unit*. Pembacaan tegangan, arus, suhu tabung, dan hasil produksi gas hidrogen dapat dipantau melalui layar LCD. Gambar

4.23 adalah stainless steel 304 dan tembaga (Cu) yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 4. 19 Elektroda
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

Pada penelitian ini peneliti hanya melakukan pengujian sistem HHO Generator menggunakan satu variasi katalis, yaitu Kalium Hidroksida (KOH). Berdasarkan penelitian sebelumnya sistem HHO Generator yang paling efektif menggunakan katalis KOH dengan konsentrasi 0,05M. untuk mengetahui massa dari 0,05M pada KOH dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut.

1. Menghitung massa KOH

Untuk menghitung massa katalisator terlebih dulu menghitung mol dengan persamaan berikut :

$$n = M \times V \quad 4.(2)$$

berikut adalah keterangan dari persamaan diatas :

n : Mol

M : Molaritas

V : Volume

$$n = 0,05 \times 1$$

$$n = 0,05 \text{ mol}$$

Kemudian menghitung massa menggunakan persamaan berikut :

$$m = n \times Mr \text{ KOH} \quad 4.(3)$$

berikut adalah keterangan dari persamaan diatas :

m : Massa (gram)

n : Mol

Mr : Molekul Reaktif

$$m = 0,05 \times 56$$

$$m = 2,81 \text{ gram}$$

Setelah mengetahui massa katalisator dilakukan penimbangan pada KOH untuk dijadikan bahan pada percobaan sistem HHO Generator. Penimbangan katalis KOH menggunakan timbangan laboratorium dengan nilai yang sesuai pada perhitungan manual. Gambar 4.24 merupakan hasil penimbangan katalis KOH yang akan digunakan pada pengujian sistem HHO Generator.



Gambar 4. 20 Penimbangan KOH
Sumber : Dokumentasi Pribadi Penulis

Pada pengujian sistem HHO Generator peneliti menggunakan *power supply* dengan spesifikasi 24 Volt 15 Ampere. Pada pengujian awal sistem HHO Generator peneliti menggunakan sistem terbuka, yang mana pada tabung elektrolizer tidak terhubung dengan selang untuk mengalirkan hasil produksi gas hidrogen ke tabung filter. Peneliti melakukan pengujian awal dengan membuka tutup tabung elektrolizer untuk melihat reaksi kimia yang terjadi dalam tabung.



Gambar 4. 21 Percobaan Elektrolisis
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

Untuk pembuktian agar yang dihasilkan merupakan gas HHO (Hidrogen dan Oksigen) dilakukan percobaan “*pop test*” hal ini dilakukan dengan mendekatkan api dari korek pada gelembung-gelembung yang dihasilkan dari proses elektrolisis. Setelah api mendekati gelembung gas, maka akan terjadi letupan-letupan yang menandakan respon pembakaran dari gas hidrogen yang dihasilkan.

4.4 Pengujian Metode PID

Pada tahapan ini, dilakukan serangkaian proses pengujian meliputi perhitungan simulasi Serta penentuan *Transfer Function* untuk mengevaluasi kinerja metode PID yang diterapkan pada sistem kontrol.

4.4.1 Pemodelan Transfer Function

Untuk mendapatkan pemodelan matematis atau yang biasa disebut dengan istilah transfer function, diperoleh dengan melakukan pengujian secara *real time* pada aktuator yang dibutuhkan berikut merupakan langkah – langkah pengambilan data :

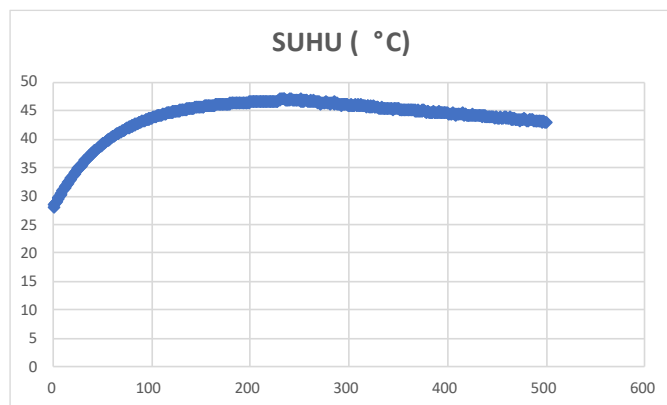
1. Pencatatan Data Suhu

Untuk menentukan pemodelan fungsi alih dari Elektroda, dilakukan pendekatan dengan menggunakan identifikasi sistem yang melibatkan pengumpulan dan

analisis data suhu yang dihasilkan oleh Elektroda tersebut. Pendekatan ini memerlukan fitur khusus dalam *software* MATLAB, yaitu toolbox System Identification, yang berfungsi untuk memperoleh pendekatan matematis yang akurat. Pendekatan matematis ini kemudian akan digunakan sebagai dasar dalam menentukan fungsi alih sistem yang dapat menggambarkan perilaku Elektroda secara tepat.

Sebelum dilakukan estimasi perhitungan formula fungsi alih dari Elektroda, sangat penting untuk mengumpulkan data yang komprehensif dan representatif. Data tersebut harus mencakup berbagai kondisi operasi Elektroda sehingga model sistem yang dihasilkan dapat menggambarkan secara akurat kinerja dan respon dari Elektroda. Data yang komprehensif ini akan digunakan sebagai dasar untuk melakukan analisis dan pemodelan lebih lanjut.

Setelah data yang diperlukan terkumpul, langkah berikutnya adalah melakukan pencatatan dan analisis data. Hasil dari pencatatan data aktuator Elektroda ini disajikan dalam bentuk grafik atau tabel, seperti yang dapat dilihat pada Gambar dibawah ini. Data ini memberikan gambaran mengenai respons Elektroda terhadap berbagai *input*, yang selanjutnya digunakan dalam proses identifikasi dan pemodelan sistem.



Gambar 4. 22 Data Suhu Tabung Elektrolizer
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

Berdasarkan Gambar 4.26 dapat dilihat bahwa data masukan dan luaran bersifat linear. Pada grafik tersebut, data suhu dari sistem elektrolizer menunjukkan bahwa ketika diberikan nilai PWM maksimal, suhu larutan mengalami kenaikan secara bertahap. Hal ini disebabkan oleh sensor suhu yang diletakkan pada air,

bukan langsung pada elektroda, sehingga respon terhadap panas menjadi lebih lambat.

Dari grafik terlihat bahwa suhu awal sistem berada pada kisaran 28–29°C, kemudian meningkat secara progresif hingga mencapai suhu maksimum sekitar 47°C dalam waktu sekitar 220 detik. Setelah mencapai puncaknya, suhu mulai menurun secara perlahan ke kisaran 42–43°C, mengikuti karakteristik pendinginan alami tanpa kontrol aktif. Pola ini menunjukkan adanya hubungan linear yang cukup jelas antara masukan PWM dan luaran suhu, meskipun terdapat keterlambatan respon karena posisi sensor.

2. Analisa Data Menggunakan fitur Identification System MATLAB

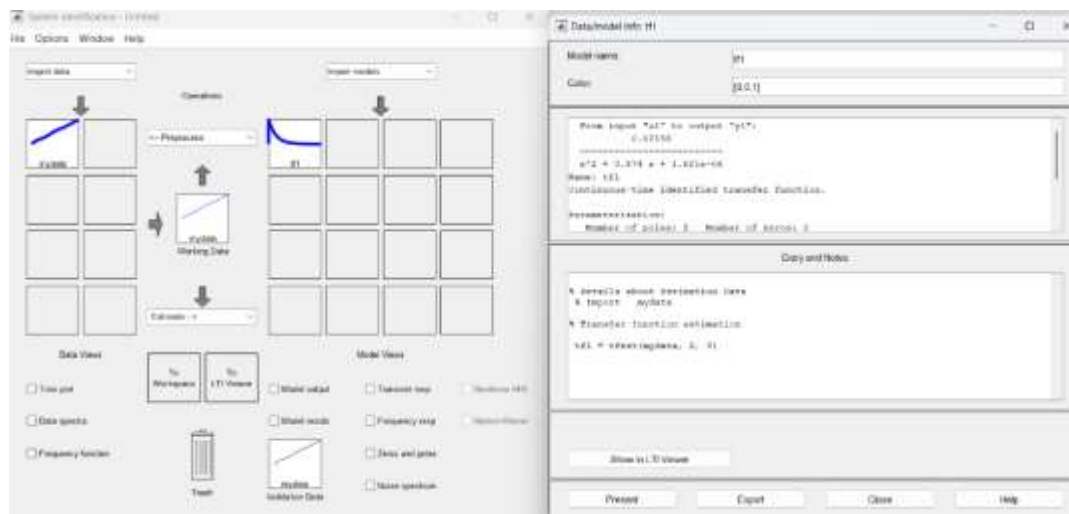
Data objek yang telah dikumpulkan kemudian diolah menggunakan toolbox System Identification di MATLAB untuk mendapatkan estimasi formula fungsi alih dari elektroda. Dengan pengambilan data menggunakan sample *time* sebesar 1 detik, dapat dilihat pada Gambar 4.27 bahwa proses pengimporan data *input* dan *output* dilakukan terlebih dahulu sebelum masuk ke tahap analisis. Setelah itu dilakukan penyetelan pada starting *time* yang digunakan sebagai penanda waktu mulai dari data atau sinyal suhu yang direkam.

Selanjutnya, dilakukan pengaturan pada sample *time*, yaitu interval waktu pengambilan data, yang dalam simulasi ini ditetapkan sebesar 1 detik. Artinya, setiap 1 detik, sistem membaca dan merekam nilai suhu. Pemilihan interval ini cukup representatif untuk menggambarkan tren perubahan suhu pada sistem elektrolizer, khususnya karena perubahan suhu terjadi secara perlahan akibat posisi sensor yang bersentuhan langsung dengan air, bukan dengan elektroda.



Gambar 4. 23 Pengaturan Data Format *For Signals*
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

Hasil estimasi fungsi alih dapat dilihat pada Gambar 4.28, terdapat fungsi alih yang dihasilkan melalui toolbox pada Matlab berupa *System Identification*.



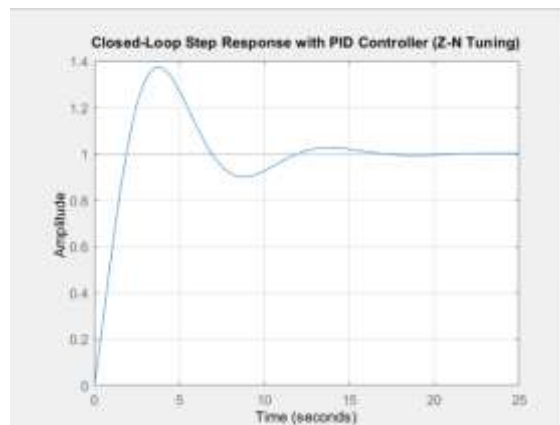
Gambar 4. 24 Hasil Estimasi Formula Fungsi Alih
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

Berdasarkan hasil estimasi tersebut, diperoleh persamaan fungsi alih elektroda. Formula (4.2) menunjukkan persamaan fungsi alih yang didapatkan, dengan satu nilai zero dan nilai ordo (pole) sebesar dua.

$$G(s) = \frac{0.02156}{s^2 + 0.874s + 1.621 \times 10^{-6}} \quad (4.2)$$

3. Analisis Step Respons Close Loop

Selanjutnya, analisis lanjutan terhadap fungsi alih yang diperoleh dilakukan melalui analisis respons langkah (step response) pada sistem yang diasumsikan beroperasi dalam kondisi loop tertutup (closed-loop). Data yang dihasilkan kemudian diproses dan divisualisasikan dalam bentuk sinyal menggunakan perintah step pada *software* MATLAB. Langkah ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik dinamis dari sistem berdasarkan persamaan (4.2). Dengan plotting data ini, dapat diamati parameter penting seperti waktu tunda, waktu kenaikan, *overshoot*, dan stabilitas sistem. Visualisasi sinyal ini memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai perilaku sistem dalam menghadapi perubahan *input* dan merupakan dasar yang penting dalam evaluasi performa sistem.



Gambar 4. 25 Step Respons Close Loop
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

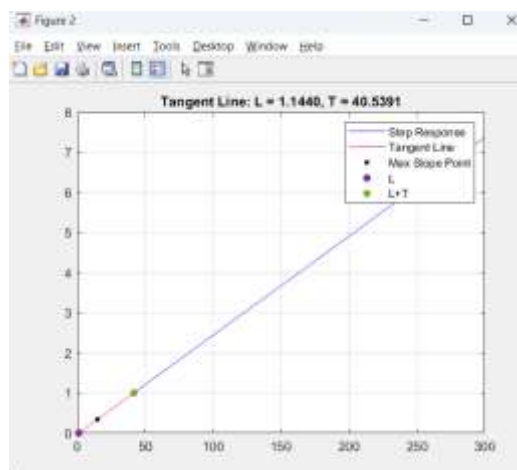
Grafik di atas menunjukkan respons sistem terhadap masukan langkah (step *input*) pada kondisi tertutup (closed-loop) dengan pengendali PID yang dituning menggunakan metode Ziegler-Nichols. Terlihat bahwa sistem merespons dengan cepat, mencapai nilai amplitudo 1 (*steady state*) pada waktu sekitar 21,9 detik. Waktu naik (*rise time*) sistem terjadi sekitar 1,88 detik, dengan nilai *overshoot* maksimum sebesar 1,37 pada waktu 3,81 detik. Nilai *overshoot* ini menunjukkan adanya respons awal yang melebihi nilai akhir sebelum sistem mencapai kestabilan. Setelah terjadinya *overshoot*, sistem menunjukkan peredaman (*damping*) dan secara bertahap menuju keadaan mantap (*steady state*), yang menandakan kestabilan sistem telah tercapai. Pola ini menunjukkan bahwa sistem memiliki

karakteristik yang cukup responsif namun perlu diperhatikan dalam mengelola *overshoot* untuk aplikasi yang sensitif terhadap lonjakan awal.

4.4.2 Penentuan Konstanta PID ZN 1

Pada tahap penentuan perhitungan manual dengan metode Ziegler-Nichols 1 diperlukan parameter L dan T, dimana L merupakan waktu tunda dari sebuah Pada tahap penentuan perhitungan manual dengan metode Ziegler-Nichols 1 diperlukan parameter L dan T, dimana L merupakan waktu tunda dari sebuah sistem atau waktu dari titik awal *input* sampai sistem mulai merespons dan T merupakan waktu proses yang mengukur kecepatan sistem yang dilakukan menggunakan garis singgung pada titik belok kurva step respon sesuai anjuran metode Ziegler-Nichols 1 yang dapat dilihat pada Tabel 4.7. Garis singgung kurva ditarik pada titik infleksi kurva untuk memperkirakan waktu tunda (L) sebagai jarak horizontal dari asal hingga titik dimana garis singgung memotong sumbu waktu, dan waktu naik (T) sebagai jarak horizontal dari titik ini.

Data hasil simulasi dapat dilihat dari Gambar 4.30 diketahui parameter L bernilai 1.1440 detik dan parameter T bernilai 40.5391 detik. Berdasarkan perhitungan dari tabel referensi Ziegler-Nichols 1 maka parameter yang sudah didapatkan akan dihitung menggunakan rumus yang ada pada Tabel 4.5.



Gambar 4. 26 Penentuan Parameter L dan T
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

Data dari hasil simulasi yang dapat dilihat pada Gambar 4.30 diketahui parameter L bernilai 1.440 detik dan parameter T bernilai 40.5391 detik. Berdasarkan perhitungan dari tabel referensi *Ziegler-Nichols* 1 maka parameter

yang sudah didapatkan akan dihitung menggunakan rumus yang ada pada Tabel 4.7 di bawah ini:

Tabel 4. 5 Referensi *Ziegler Nichols* 1

| Tipe Kontrol | Kp | Ti | Td |
|--------------|-------------------|-----------------|------|
| P | $\frac{T}{L}$ | ∞ | 0 |
| PI | $0.9 \frac{T}{L}$ | $\frac{L}{0.3}$ | 0 |
| PID | $1.2 \frac{T}{L}$ | 2L | 0.5L |

Untuk menentukan konstanta P pada sistem kontrol Proporsional dapat digunakan rumus Kp yang didapatkan dari tabel referensi Ziegler-Nichols 1. Perhitungan konstanta P dapat dilihat sebagai berikut :

$$K_p = \frac{T}{L} \quad (4.3)$$

$$K_p = \frac{40.5391}{1.1440} = 35.43628$$

Untuk menentukan konstanta P dan I pada sistem kontrol *Proportional - Integral* metode PID *Ziegler-Nichols 1* dapat menggunakan rumus Kp-Ti-Ki perhitungan konstanta PI dapat dilihat sebagai berikut :

$$K_p = 0.9 \frac{T}{L} \quad (4.4)$$

$$K_p = 0.9 \frac{40.5391}{1.1440} = 31.89265$$

$$T_i = \frac{L}{0.3} \quad (4.5)$$

$$T_i = \frac{1.1440}{0.3} = 3.813$$

$$K_i = \frac{T_i}{K_p} = \frac{3.813}{31.89265} = 0.119$$

Untuk menentukan konstanta P dan D pada sistem kontrol *Proportional - Derivative* dengan metode PID *Ziegler-Nichols 1* dapat menggunakan rumus Kp-Td-Kd perhitungan konstanta PD dapat dilihat sebagai berikut :

$$K_p = 1.2 \frac{T}{L} \quad (4.6)$$

$$K_p = 1.2 \frac{40.5391}{1.1440} = 42.52353$$

$$T_d = 0.5 \times L \quad (4.7)$$

$$T_d = 0.5 \times 1.1440 = 0.572$$

$$K_d = T_d \times K_p \quad (4.8)$$

$$\mathbf{Kd} = 0.572 \times 42.52353 = 24.323$$

Langkah berikutnya untuk menentukan konstanta P, I dan D pada sistem kontrol Proportional-Integral-Derivative pada metode PID Ziegler-Nichols 1 dapat menggunakan rumus Kp-Ti-Td-Ki dan Kd perhitungan konstanta PID dapat dilihat sebagai berikut :

$$Kp = 1.2 \frac{T}{L} \quad (4.9)$$

$$\mathbf{Kp} = 1.2 \frac{40.5391}{1.1440} = 42.52353$$

$$Ti = 2 \times L \quad (4.10)$$

$$\mathbf{Ti} = 2 \times 1.1440 = 2.288$$

$$Td = 0.5 \times L \quad (4.11)$$

$$\mathbf{Td} = 0.5 \times 1.1440 = 0.572$$

$$Ki = \frac{Kp}{Ti} \quad (4.12)$$

$$\mathbf{Ki} = \frac{42.52353}{2.288} = 18.58546$$

$$Kd = Td \times Kp \quad (4.13)$$

$$\mathbf{Kd} = 0.572 \times 42.52353 = 24.323$$

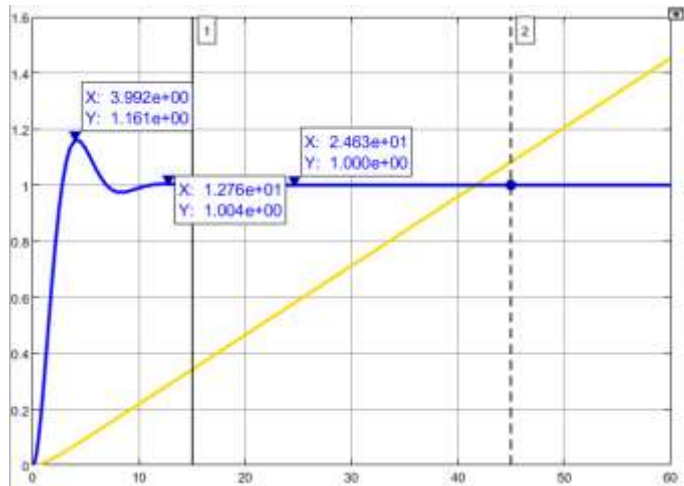
Sehingga didapatkan nilai Kp = 42.52353, Ki = 18.58546, dan Kd = 24.323

4.4.3 Simulasi Tuning Manual Dengan Metode PID *Ziegler-Nichols 1*

Pada tahap simulasi tuning dengan metode PID *Ziegler-Nichols 1* ini dilakukan dengan menggunakan *software* MATLAB dengan melakukan penginputan nilai dari perhitungan secara manual yang didapatkan dari hasil perhitungan konstanta PID *Ziegler-Nichols 1*.

4.4.3.1 Simulasi Manual Tuning Konstanta P *Ziegler-Nichols 1*

Langkah-langkah pada tahap simulasi tuning konstanta P pada *software* MATLAB dilakukan penginputan hasil dari perhitungan 4.3 yang mengacu pada tabel referensi *Ziegler-Nichols 1*, kemudian hasil dari simulasi akan ditampilkan oleh *scope software* MATLAB, hasil dari simulasi konstanta P dapat dilihat pada Gambar 4.27.



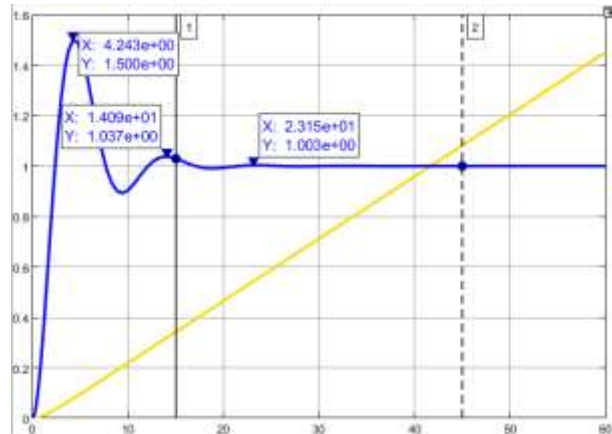
Gambar 4. 27 Simulasi Menggunakan Konstanta P Ziegler Nichols-1
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

Hasil respon sistem PID menunjukkan bahwa sistem memiliki waktu *rise time* sebesar 1,873 detik, dengan *overshoot* sebesar 15,6%, dan nilai maksimum respons sebesar 1,161. Sistem mencapai kondisi *steady state* pada waktu sekitar 24,43 detik dengan nilai akhir sebesar 1,00. Waktu *settling time* yang dibutuhkan untuk mencapai kestabilan adalah sekitar 29,94 detik, berdasarkan nilai parameter yang ditampilkan. Dari grafik juga terlihat bahwa sistem mengalami sedikit osilasi sebelum akhirnya stabil, menandakan sistem memiliki damping yang cukup baik dan berhasil mengikuti *setpoint* yang diinginkan dengan respons yang relatif cepat dan stabil.

4.4.3.2 Simulasi Manual Tuning Konstanta P dan I Ziegler-Nichols 1

Langkah-langkah pada tahap simulasi tuning konstanta P dan I pada *software* MATLAB dilakukan dengan *penginputan* hasil dari perhitungan yang telah dilakukan pada tahap sebelumnya, yaitu perhitungan (4.5) yang mengacu pada tabel referensi Ziegler-Nichols 1. Dalam proses ini, nilai-nilai konstanta yang diperoleh dari perhitungan tersebut dimasukkan ke dalam MATLAB untuk menjalankan simulasi. Setelah *penginputan* selesai, *software* MATLAB akan menjalankan simulasi tersebut dan menampilkan hasilnya menggunakan fitur *scope* yang ada dalam *software* tersebut. Hasil dari simulasi konstanta P kemudian dapat dilihat dan dianalisis pada Gambar 4.32. Gambar tersebut menampilkan grafik yang menunjukkan respons sistem terhadap konstanta P yang telah dituning, memberikan

gambaran visual tentang bagaimana sistem berperilaku dengan pengaturan tersebut. Dengan demikian, pengguna dapat mengevaluasi dan menilai efektivitas tuning yang dilakukan sebelum melanjutkan ke tahap berikutnya atau melakukan penyesuaian lebih lanjut jika diperlukan.

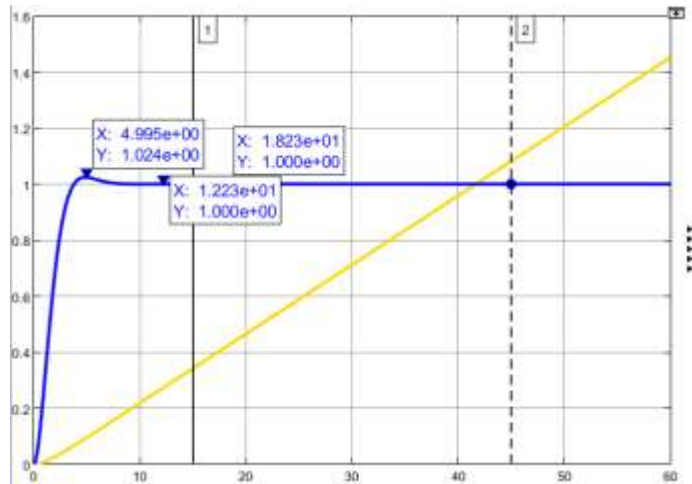


Gambar 4. 28 Simulasi Menggunakan Konstanta P-I Ziegler Nichols 1
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

Hasil respon sistem menunjukkan bahwa sistem memiliki waktu *rise time* sebesar 1,537 detik dan nilai *overshoot* sebesar 50,76% dengan nilai puncak maksimum mencapai 1,5 pada waktu 4,243 detik. Nilai *steady state* tercapai pada amplitudo 1,003, dengan waktu mencapai *steady state* sekitar 23,15 detik. Sistem juga menunjukkan adanya undershoot sebesar -9,93%, yang mengindikasikan adanya penurunan di bawah *setpoint* setelah terjadi *overshoot*. Meskipun terdapat osilasi awal, sistem secara keseluruhan mampu mencapai kestabilan dengan nilai akhir yang mendekati *setpoint*. Karakteristik ini mencerminkan sistem yang responsif, namun masih menunjukkan gejala transient yang signifikan dan perlu dioptimalkan untuk mengurangi *overshoot* serta mempercepat waktu stabil.

4.4.3.3 Simulasi Manual Tuning Konstanta P dan D Ziegler-Nichols 1

Langkah selanjutnya pada tahap simulasi tuning konstanta *Proportional* dan *Derivative* pada *software* MATLAB dilakukan penginputan hasil dari perhitungan 4.8 yang mengacu pada tabel referensi *Ziegler-nichols* 1, kemudian hasil dari simulasi akan ditampilkan oleh *scope software* MATLAB, hasil dari simulasi konstanta P dan D dapat dilihat pada Gambar 4.33.



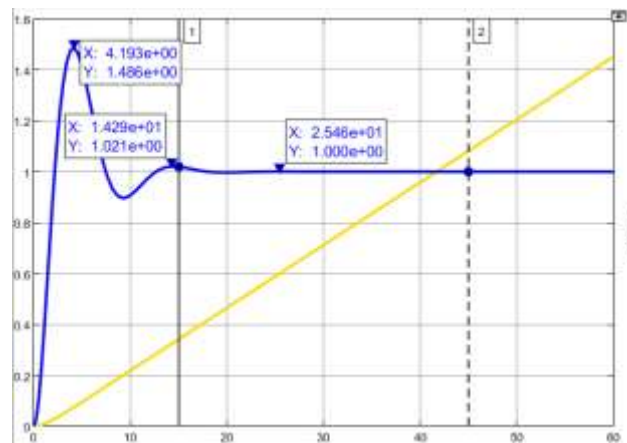
Gambar 4. 29 Simulasi Menggunakan Konstanta P-D Ziegler Nichols 1
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

Berdasarkan hasil grafik 4.33 respon sistem, diketahui bahwa sistem memiliki waktu *rise time* sebesar 3,229 detik dan mengalami *overshoot* sebesar 2,577% dengan nilai maksimum mencapai 1,024 pada waktu 4,995 detik. Setelah mengalami sedikit osilasi awal, sistem mencapai kondisi *steady state* pada nilai 1,00 sekitar waktu 18,23 detik, menunjukkan bahwa sistem relatif cepat dalam merespons perubahan masukan. Selain itu, terdapat *undershoot* sebesar 1,513%, namun nilainya tergolong kecil dan tidak terlalu memengaruhi kestabilan sistem. Secara keseluruhan, sistem menunjukkan karakteristik respons yang stabil, presisi, dan minim transient error, menjadikannya sesuai untuk pengendalian yang membutuhkan kestabilan tinggi dan akurasi terhadap *setpoint*.

4.4.3.4 Simulasi Manual Tuning Konstanta P-I-D Ziegler-Nichols 1

Selanjutnya, pada tahap simulasi tuning konstanta Proportional, Integral, dan *Derivative* (PID) pada *software* MATLAB, dilakukan penginputan hasil dari perhitungan yang telah dilakukan pada langkah 4.13. Perhitungan tersebut mengacu pada tabel referensi *Ziegler-Nichols* 1, yang merupakan metode standar untuk menentukan nilai-nilai awal tuning PID. Nilai-nilai konstanta yang diperoleh dari perhitungan tersebut kemudian dimasukkan ke dalam *software* MATLAB untuk memulai simulasi. Setelah nilai-nilai konstanta PID diinput, *software* MATLAB akan menjalankan simulasi dan menampilkan hasilnya melalui fitur *scope*. Fitur

scope ini memungkinkan pengguna untuk melihat grafik respons sistem secara *realtime*. Hasil dari simulasi tuning konstanta *Proportional* (P) dan *Derivative* (D) dapat dilihat dan dianalisis pada Gambar 4.34. Gambar tersebut menampilkan respons dinamis dari sistem terhadap pengaturan konstanta P dan D yang telah ditentukan, memberikan gambaran visual tentang performa sistem dengan tuning yang dilakukan. Dengan demikian, pengguna dapat mengevaluasi efektivitas dari tuning yang dilakukan, dan jika perlu, melakukan penyesuaian lebih lanjut untuk mengoptimalkan kinerja sistem sebelum diterapkan dalam kondisi sebenarnya. Proses ini sangat penting untuk memastikan bahwa sistem PID berfungsi dengan optimal dan stabil dalam berbagai kondisi operasional.



Gambar 4. 30 Simulasi Menggunakan Konstanta PID Ziegler Nichols 1

Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

Dari hasil grafik respon sistem, diperoleh bahwa sistem memiliki waktu *rise time* sebesar 1,471 detik, dengan nilai *overshoot* yang cukup tinggi yaitu sebesar 40,407%. Nilai puncak maksimum terjadi pada waktu 4,159 detik dengan amplitudo sebesar 1,406. Setelah mengalami osilasi awal, sistem mulai menurun dan mencapai kondisi *steady state* pada nilai 1,00 sekitar waktu 25,46 detik. Selain *overshoot*, sistem juga mengalami *undershoot* sebesar 4,541%, yang menunjukkan adanya penurunan sementara di bawah nilai *setpoint*. Karakteristik ini mencerminkan sistem yang cukup responsif, namun masih menunjukkan dinamika transien yang kuat dan memerlukan perbaikan untuk menekan osilasi serta mempercepat kestabilan agar lebih sesuai untuk pengendalian presisi.

4.5 Pengujian Keseluruhan Sistem

Pentingnya mengintegrasikan prototipe secara menyeluruh terletak pada upaya untuk membentuk sebuah sistem yang utuh dan berfungsi secara optimal. Proses integrasi ini menggabungkan berbagai komponen, modul, serta teknologi yang telah dirancang menjadi sebuah sistem yang saling terhubung secara harmonis. Melalui integrasi ini, kinerja dan interaksi antar elemen dapat divalidasi secara menyeluruh, sekaligus memastikan bahwa setiap bagian beroperasi sesuai dengan tujuan dan kriteria penelitian yang telah ditetapkan. Pendekatan integratif memungkinkan pengembangan prototipe menjadi lebih terarah dan efisien, sebab setiap komponen diuji dan disesuaikan secara menyeluruh guna memperoleh hasil yang maksimal. Selain itu, integrasi yang tepat juga mampu menghasilkan solusi yang lebih komprehensif dan berkelanjutan dalam menghadapi tantangan teknologi, serta memungkinkan produk akhir mampu menjawab kebutuhan pengguna dengan lebih andal dan efektif.

4.5.1 Kontrol Manual

Pada kontrol manual *push button* yang digunakan untuk memilih mode belum ditekan dan layar LCD menampilkan manual mode. Setelah manual mode berjalan, sensor suhu, tegangan, arus dan gas berfungsi sebagai sistem monitoring untuk kondisi HHO Generator. Untuk mengatur tegangan *input* yang dialirkan pada elektroda HHO Generator diatur melalui program dengan memasukkan nilai pwm 153 atau senilai dengan 15 V. Pada mode manual ini metode kontrol PID tidak diterapkan dalam proses pengontrolan suhu pada tabung elektrolizer. Penggunaan mode manual ini bertujuan untuk mengetahui respon suhu terhadap tegangan yang diatur secara stabil dan tidak ada *feedback*. Pengamatan ini merupakan langkah yang sangat penting untuk mengetahui dan menganalisa respon suhu dan bagaimana efektifitas proses elektrolisis pada sistem HHO Generator.

Selama percobaan sistem HHO Generator dengan mode manual ini, sistem monitoring atau pemantauan dapat berjalan dengan optimal sebagaimana fungsinya. Proses pemanasan elektroda dengan mode manual berlangsung secara linear dan bertahap. Pemanasan elektroda bisa mencapai suhu 43-44 derajat. Namun, setelah mencapai suhu puncaknya perlahan suhu tabung turun dan

mencapai suhu 39-40 derajat. Hal ini disebabkan karena pada tabung elektrolizer larutan yang digunakan tidak sepenuhnya tersentuh oleh elektroda. Apabila setiap larutan dalam tabung dapat tersentuh elektroda proses elektrolisis dapat berlangsung lebih efektif, suhu dapat bertahan lebih lama, dan proses produksi dapat lebih cepat. Proses pengujian sistem HHO Generator dengan mode manual menunjukkan hasil produksi gas yang cukup signifikan.

4.5.2 Kontrol Otomatis

Pada kontrol otomatis, *push button* ditekan untuk sistem berubah menjadi auto atau otomatis yang ditandai dengan tampilan layar dari LCD berupa mode auto. Perbedaan mode auto dan mode manual adalah dengan diterapkannya metode kontrol PID untuk pengontrolan suhu pada tabung elektrolizer. Sensor suhu selain digunakan untuk sistem pemantauan juga digunakan untuk *feedback* pada sistem kontrol PID. Untuk sensor tegangan, arus, dan gas digunakan sebagai pemantauan sistem HHO Generator. Tujuan penggunaan kontrol mode otomatis ini digunakan untuk mempercepat proses produksi gas hidrogen dan mengontrol suhu tabung elektrolizer. Pada kontrol otomatis ini dilakukan beberapa percobaan dengan parameter yang berbeda-beda sesuai dengan persamaan pada penentuan konstanta PID *Ziegler Nichols-1*. Dari parameter tersebut akan digunakan yang terbaik hasilnya sehingga hasil produksi gas hidrogen menjadi efisien.

4.5.3 Pengujian Tanpa Metode (Manual)

Pada pengujian tanpa metode atau dengan mode manual sistem HHO Generator yang digunakan menggunakan elektroda satu jenis elektroda yaitu *stainless steel* untuk anoda dan tembaga (Cu) untuk katoda. Dengan spesifikasi berbentuk persegi panjang (15cm×4cm×2mm), jumlah plat pada anoda 6 dan pada katoda 6 sehingga jumlah elektroda 12 plat. Pada pengujian ini tabung elektrolizer berisikan air 1 liter dengan katalis KOH dengan berat 2,81 gram. Hasil produksi gas yang ditampung pada wadah plastik dapat dipenuhi dengan waktu pengujian rata-rata yang ditampilkan pada tabel 4.6 berikut.

Tabel 4. 6 Tabel Data Pengujian Mode Manual

| Pengujian | Waktu Produksi Gas (menit) | Waktu Produksi Gas (jam:menit) |
|-----------|----------------------------|--------------------------------|
| 1 | 80 | 1 jam 20 menit |

| Pengujian | Waktu Produksi Gas (menit) | Waktu Produksi Gas (jam:menit) |
|-----------|----------------------------|--------------------------------|
| 2 | 75 | 1 jam 15 menit |
| 3 | 79 | 1 jam 19 menit |

Dari perolehan data pengujian diatas, maka diperoleh nilai rata-rata dari waktu yang dibutuhkan pada alat HHO Generator tanpa metode atau manual untuk memenuhi wadah plastik dengan persamaan berikut.

$$\text{rata - rata waktu} = \frac{80+75+79}{3} = 78 \text{ menit atau 1 jam 18 menit.}$$

Dari perhitungan nilai rata-rata waktu data pengujian diatas, maka diperoleh nilai rata-rata dari waktu yang dibutuhkan pada alat HHO Generator tanpa metode atau manual untuk memenuhi wadah plastik selama 1 jam 18 menit. Dengan volume wadah plastik yang dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\text{Volume Wadah} = \pi \times r^2 \times h \quad 4.(14)$$

Berikut adalah keterangan dari persamaan diatas :

π : bernilai 3,14

r : Jari-jari wadah

h : Tinggi wadah

$$\text{Volume Wadah} = 3,14 \times 3^2 \times 20$$

$$\text{Volume Wadah} = 565,2 \text{ cm}^3$$

Dengan diketahuinya volume wadah plastik, debit aliran gas dapat diketahui dengan persamaan berikut :

$$Q = \frac{V (\text{Volume})}{t (\text{waktu})} \quad 4.(15)$$

Berikut adalah keterangan dari persamaan diatas :

Q : Debit aliran gas

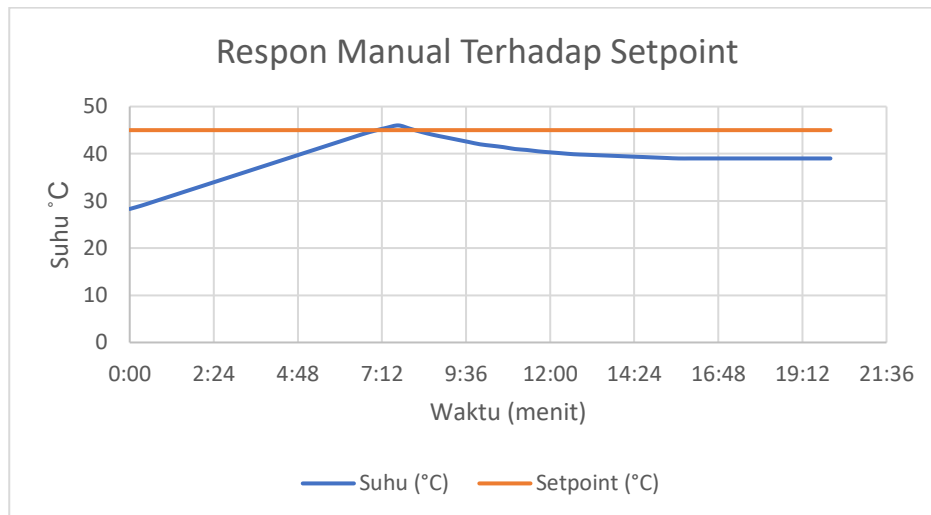
V : Volume plastik

t : Waktu produksi gas

$$Q = \frac{565,2}{1 \text{ jam 18 menit}} = \frac{565,2 \text{ cm}^3}{4680 \text{ s}}$$

$$Q = 0,1207 \text{ cm}^3/\text{s}$$

Dari persamaan 4.(15) sudah diketahui bahwa debit aliran gas hidrogen pada mode manual adalah 0,1207 cm³/s atau sama dengan 0,1207 ml/s. Pada percobaan ini peneliti juga melakukan pengamatan dan analisa terhadap nilai suhu yang dihasilkan dengan grafik 4.31 berikut.



Gambar 4. 31 Grafik Respon Suhu Mode Manual
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

Grafik respon suhu pada mode manual menunjukkan adanya peningkatan suhu yang cukup signifikan pada awal proses elektrolisis HHO. Suhu awal tercatat sekitar 28°C, dan mengalami kenaikan secara bertahap hingga mencapai puncak sekitar 44°C. Peningkatan ini mencerminkan bahwa proses elektrolisis menghasilkan panas akibat aliran arus listrik melalui larutan elektrolit. Karena pengaturan dilakukan secara manual, tidak terdapat mekanisme otomatis yang mengatur besar kecilnya arus atau tegangan berdasarkan suhu aktual yang terbaca oleh sensor.

Setelah mencapai suhu maksimum, grafik menunjukkan adanya penurunan suhu secara bertahap, yang kemudian diikuti oleh fase stabilisasi pada kisaran 40°C. Stabilisasi ini kemungkinan terjadi karena daya atau arus listrik yang diberikan telah dikurangi secara manual, atau karena telah tercapai keseimbangan termal antara panas yang dihasilkan oleh proses elektrolisis dan panas yang dilepaskan ke lingkungan. Namun, kestabilan ini tidak dikendalikan secara aktif oleh sistem, sehingga besar kemungkinan perubahan lingkungan atau beban dapat kembali memengaruhi suhu secara signifikan.

Secara keseluruhan, grafik ini menunjukkan bahwa mode manual mampu meningkatkan suhu tabung elektroliser hingga batas tertentu dan mempertahankan suhu pada rentang yang masih mendukung berlangsungnya proses elektrolisis. Akan tetapi, karena tidak adanya kontrol dinamis berbasis sensor dan algoritma kendali seperti PID, sistem ini tidak mampu merespons fluktuasi suhu secara *real-*

time. Kondisi ini memperkuat urgensi penggunaan mode otomatis yang mampu menjaga suhu tetap berada dalam rentang optimal, meningkatkan efisiensi proses, serta mencegah risiko kerusakan akibat suhu yang melebihi batas aman.

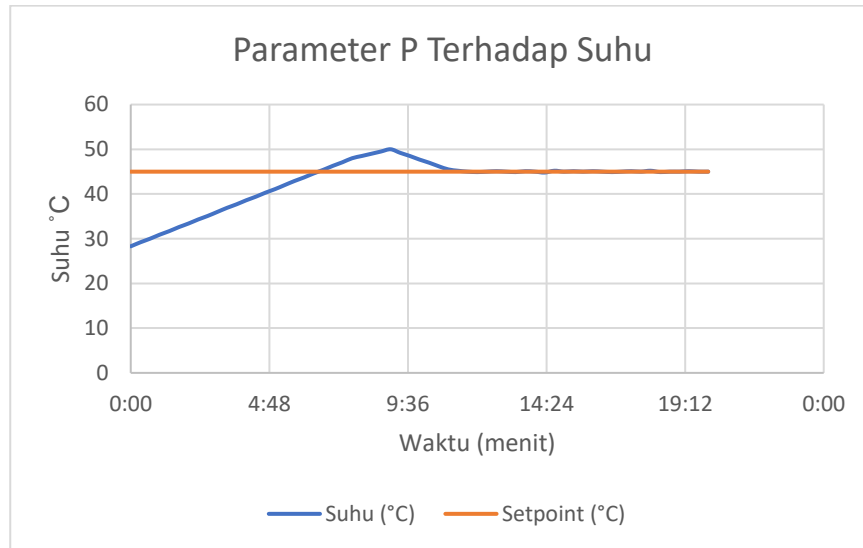
4.5.4 Pengujian Menggunakan Metode (Auto)

Pada pengujian dengan metode atau dengan mode auto sistem HHO Generator yang digunakan menggunakan elektroda satu jenis elektroda yaitu *stainless steel* untuk anoda dan tembaga (Cu) untuk katoda. Dengan spesifikasi berbentuk persegi panjang (15cm×4cm×2mm), jumlah plat pada anoda 6 dan pada katoda 6 sehingga jumlah elektroda 12 plat. Pada pengujian ini tabung elektrolizer berisikan air 1 liter dengan katalis KOH dengan berat 2,81 gram.

Pengujian metode PID untuk sistem elektrolisis HHO Generator menggunakan satu *setpoint* dengan suhu dari kondisi awal hingga 45°C. Parameter yang digunakan dalam setiap pengujian memiliki nilai parameter sesuai pada simulasi. Nilai PWM yang dihasilkan dalam rentang 0-255 dihitung berdasarkan Kp, Ki, dan Kd. Pengujian ini bertujuan untuk menjaga suhu tetap pada 45°C. Proses monitoring suhu dibaca dengan serial monitor setiap detik.

4.5.4.1 Pengujian Metode Parameter P

Pada pengimplementasian Tuning kontrol P dengan metode Tuning *Ziegler-Nichols 1* didapatkan nilai konstanta Kp sebesar 35.43628. hasil dari implementasi ini menunjukkan bahwa sistem tidak dapat stabil dalam *setpoint* suhu 45°C. berikut hasil dari implementasi kontrol P pada metode *Ziegler-Nichols 1* yang dapat dilihat pada Gambar 4.32.



Gambar 4. 32 Grafik Implementasi Kontrol P Ziegler Nichols 1
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

Berdasarkan Gambar 4.32, implementasi kontrol P dengan metode Ziegler-Nichols 1 menunjukkan bahwa sistem mengalami respons yang belum optimal terhadap *setpoint* suhu sebesar 45°C. Dari grafik dapat diamati bahwa suhu awal sistem berada pada kisaran 30°C, kemudian meningkat secara bertahap hingga mencapai suhu maksimum sekitar 51°C. Kondisi ini menunjukkan adanya *overshoot* sebesar 13,33%, yang mengindikasikan bahwa sistem memberikan respons yang terlalu agresif terhadap *setpoint*. Selain itu, waktu yang dibutuhkan oleh sistem untuk mencapai suhu *setpoint* (*rise time*) tercatat sekitar 9 menit, yang menunjukkan bahwa respons awal sistem tergolong lambat.

Setelah mengalami *overshoot*, suhu perlahan menurun dan mulai mendekati nilai *setpoint*. Namun, suhu tidak benar-benar stabil tepat pada 45°C, melainkan berada sedikit di bawahnya, yaitu sekitar 44,5°C. Hal ini menunjukkan adanya steady-state error sebesar 0,5°C, yang merupakan karakteristik umum dari kontrol P murni karena tidak adanya aksi *integral* yang berfungsi untuk mengeliminasi error secara penuh. Suhu mulai stabil dan berada dalam rentang toleransi $\pm 5\%$ dari *setpoint* (antara 42,75°C hingga 47,25°C) sekitar menit ke-15, sehingga waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai kondisi mantap (*settling time*) adalah sekitar 15 menit.

Secara keseluruhan, hasil implementasi kontrol P dengan konstanta proporsional $K_p=35.43628$ menunjukkan bahwa meskipun sistem mampu

mengikuti perubahan suhu menuju *setpoint*, namun kestabilan sistem belum sepenuhnya tercapai. Hal ini dibuktikan dengan adanya *overshoot* yang cukup besar, waktu respon yang lambat, serta adanya error pada keadaan tunak. Dengan demikian, diperlukan penyesuaian lebih lanjut terhadap parameter kontrol atau penggunaan metode kontrol tambahan seperti PI atau PID untuk memperoleh performa sistem yang lebih stabil dan presisi.

Tabel 4. 7 Tabel Data Pengujian Parameter P

| Pengujian | Waktu Produksi Gas (menit) | Waktu Produksi Gas (jam:menit) |
|-----------|----------------------------|--------------------------------|
| 1 | 60 | 1 jam |
| 2 | 62 | 1 jam 2 menit |
| 3 | 64 | 1 jam 4 menit |

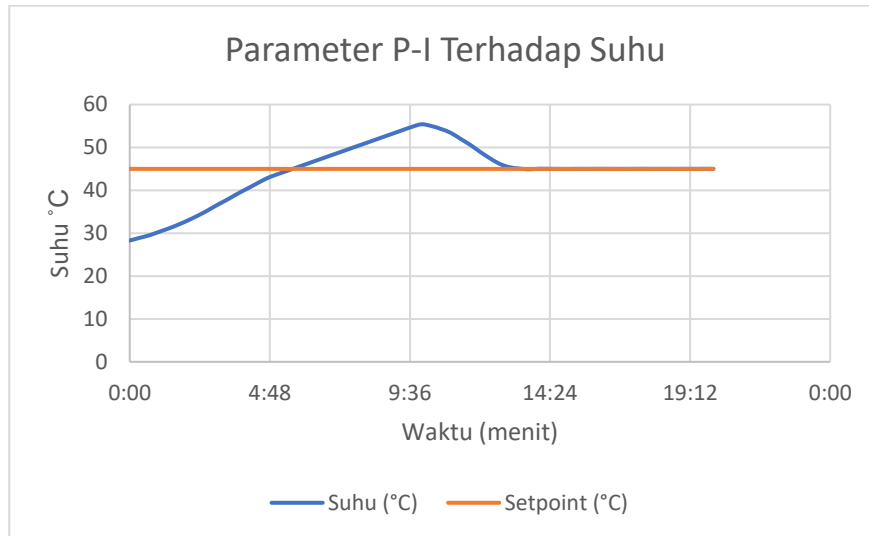
Dari perolehan data pengujian diatas, maka diperoleh nilai rata-rata dari waktu yang dibutuhkan pada alat HHO Generator dengan metode menggunakan parameter P untuk memenuhi wadah plastik dengan persamaan berikut.

$$rata - rata waktu = \frac{60+62+64}{3} = 62 \text{ menit atau } 1 \text{ jam } 2 \text{ menit.}$$

Dari perhitungan nilai rata-rata waktu data pengujian diatas, maka diperoleh nilai rata-rata dari waktu yang dibutuhkan pada alat HHO Generator dengan metode menggunakan parameter P untuk memenuhi wadah plastik selama 1 jam 2 menit.

4.5.4.2 Pengujian Metode Parameter P dan I

Grafik 4.33 menunjukkan bahwa dengan menggunakan metode kontrol P-I berdasarkan parameter Ziegler-Nichols 1 ($K_p = 31,89265$ dan $K_i = 0,119$), sistem mampu merespons kenaikan suhu menuju *setpoint* dengan cukup cepat. Namun, terlihat adanya *overshoot* yang cukup tinggi melebihi nilai *setpoint* awal sebesar 45°C . Sistem menunjukkan bahwa respon awal masih belum stabil, namun seiring waktu sistem mulai merespon mendekati nilai *setpoint* dengan lebih baik. Secara umum, kontrol P-I ini menunjukkan bahwa sistem masih kurang stabil dan belum bisa mempertahankan suhu dengan baik di sekitar nilai *setpoint*. Hal ini wajar karena hanya menggunakan dua parameter (P dan I), dan belum mengatur efek kecepatan perubahan melalui D (derivatif).



Gambar 4. 33 Grafik Implementasi Kontrol P-I Ziegler Nichols 1
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

Berdasarkan grafik 4.33, respon suhu terhadap kontroler P-I menunjukkan bahwa sistem mencapai nilai puncak sebesar $\pm 55,3^{\circ}\text{C}$ pada menit ke-2, menunjukkan adanya *overshoot* sebesar $\pm 10,3^{\circ}\text{C}$ terhadap *setpoint* 45°C . Hal ini mengindikasikan bahwa kontroler merespons dengan agresif terhadap perubahan, yang merupakan karakteristik umum dari metode Ziegler-Nichols 1.

Setelah mencapai puncak, suhu mengalami penurunan (*undershoot* ringan) dan kemudian mulai mendekati nilai *setpoint*. Proses menuju kondisi *steady state* berlangsung secara bertahap, dan mulai menunjukkan kestabilan mendekati menit ke-10 hingga akhir pengujian.

Meskipun sistem belum sepenuhnya stabil dalam waktu singkat, namun pergerakan suhu mulai menyatu dengan nilai *setpoint* secara perlahan, yang menandakan karakteristik sistem yang mulai *steady* namun masih menyisakan fluktuasi kecil. Ini disebabkan oleh parameter P-I yang tidak memiliki kontrol derivatif (D), sehingga kecepatan perubahan suhu belum dikompensasi secara optimal.

Dengan hanya menggunakan kontroler P dan I, sistem belum mampu menahan *overshoot* secara efektif dan respon terhadap gangguan atau perubahan suhu masih lambat mereda. Untuk sistem dengan dinamika seperti ini, penambahan kontrol derivatif (D) pada kontroler PID dapat meningkatkan performa dengan mengurangi *overshoot* dan mempercepat pencapaian *steady state*.

Tabel 4. 8 Tabel Data Pengujian Parameter PI

| Pengujian | Waktu Produksi Gas (menit) | Waktu Produksi Gas (jam:menit) |
|-----------|----------------------------|--------------------------------|
| 1 | 65 | 1 jam 5 menit |
| 2 | 68 | 1 jam 8 menit |
| 3 | 64 | 1 jam 4 menit |

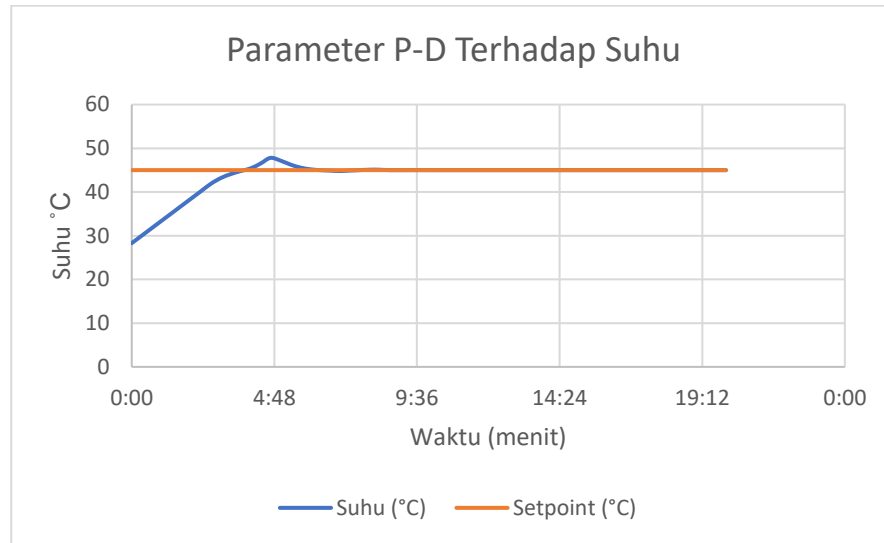
Dari perolehan data pengujian diatas, maka diperoleh nilai rata-rata dari waktu yang dibutuhkan pada alat HHO Generator dengan metode menggunakan parameter P dan I untuk memenuhi wadah plastik dengan persamaan berikut.

$$\text{rata - rata waktu} = \frac{65+68+64}{3} = 66 \text{ menit atau 1 jam 6 menit.}$$

Dari perhitungan nilai rata-rata waktu data pengujian diatas, maka diperoleh nilai rata-rata dari waktu yang dibutuhkan pada alat HHO Generator dengan metode menggunakan parameter P dan I untuk memenuhi wadah plastik selama 1 jam 6 menit.

4.5.4.3 Pengujian Metode Parameter P dan D

Grafik 4.34 menunjukkan bahwa dengan menggunakan kontrol P-D berdasarkan parameter *Ziegler-Nichols 1* ($K_p = 31,89265$ dan $K_d = 24,323$), sistem mampu merespons perubahan suhu dengan cepat tanpa menunjukkan *overshoot* yang signifikan. Suhu langsung naik menuju *setpoint* 45°C dan relatif stabil setelahnya. Osilasi tersebut berulang tetapi tidak terlalu mencolok, yang menandakan bahwa respons sistem cukup baik namun belum sepenuhnya halus. Penggunaan parameter derivatif (D) memberikan efek prediktif yang membantu sistem meredam kenaikan suhu yang terlalu cepat. Namun karena tidak ada *integral* (I), sistem cenderung tidak terlalu presisi dalam menghilangkan error kecil jangka panjang. Secara umum, kontrol P-D menghasilkan performa yang cukup stabil dan cepat, dengan respons yang cukup baik namun tidak sempurna dalam hal kestabilan jangka panjang. Kombinasi ini cukup cocok untuk proses yang butuh reaksi cepat tetapi tidak terlalu sensitif terhadap error kecil.



Gambar 4. 34 Grafik Implementasi Kontrol P-D Ziegler Nichols 1
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

Berdasarkan grafik 4.34, sistem menunjukkan karakteristik respon cepat dengan waktu mencapai *setpoint* sekitar menit ke-5, tanpa adanya *overshoot* yang mencolok yaitu 2,5%. Garis suhu langsung naik dari suhu awal menuju 45°C secara linier dan cepat, dan setelah mendekati *setpoint*, suhu mulai stabil dan tetap berada di sekitar nilai tersebut hingga akhir pengujian.

Hal ini menandakan bahwa sistem mampu menghindari lonjakan suhu yang berlebihan, yang biasa terjadi pada kontrol P saja. Adanya komponen derivatif (D) pada kontrol P-D berperan penting dalam meredam laju kenaikan suhu sehingga sistem tidak terlalu agresif dan tetap terkontrol.

Selama fase steady-state, suhu menunjukkan kestabilan yang baik dengan fluktuasi yang sangat kecil, menandakan bahwa sistem mulai masuk ke kondisi tunak. Respon ini cukup ideal untuk sistem yang memerlukan reaksi cepat namun tetap stabil terhadap perubahan referensi suhu.

Meskipun kontrol P-D tidak memiliki komponen *integral* (I) yang berfungsi untuk menghilangkan error steady-state kecil secara sempurna, dari grafik terlihat bahwa error sisa (steady-state error) berada pada tingkat yang sangat rendah dan dapat ditoleransi untuk kebutuhan praktis. Ini menunjukkan bahwa untuk proses yang menuntut kecepatan respon tinggi dengan kestabilan relatif baik, kontrol P-D menjadi alternatif yang layak dan efektif.

Tabel 4. 9 Tabel Data Pengujian Parameter PD

| Pengujian | Waktu Produksi Gas (menit) | Waktu Produksi Gas (jam:menit) |
|-----------|----------------------------|--------------------------------|
| 1 | 58 | 0 jam 58 menit |
| 2 | 57 | 0 jam 57 menit |
| 3 | 59 | 0 jam 59 menit |

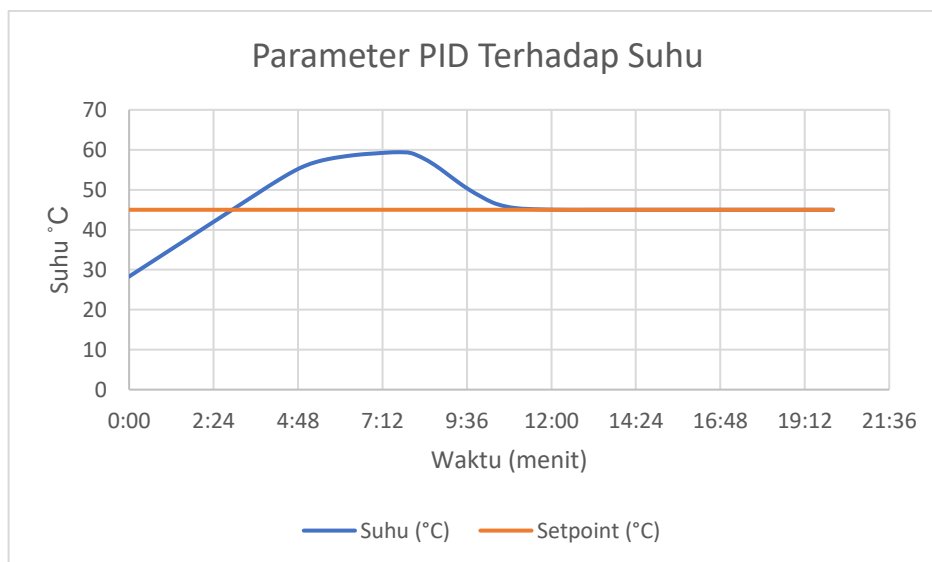
Dari perolehan data pengujian diatas, maka diperoleh nilai rata-rata dari waktu yang dibutuhkan pada alat HHO Generator dengan metode menggunakan parameter P dan D untuk memenuhi wadah plastik dengan persamaan berikut.

$$\text{rata - rata waktu} = \frac{58+57+59}{3} = 58 \text{ menit}$$

Dari perhitungan nilai rata-rata waktu data pengujian diatas, maka diperoleh nilai rata-rata dari waktu yang dibutuhkan pada alat HHO Generator dengan metode menggunakan parameter P dan D untuk memenuhi wadah plastik selama 58 menit.

4.5.4.4 Pengujian Metode Parameter PID

Grafik 4.35 menunjukkan bahwa sistem dengan menggunakan kontrol PID berbasis parameter Ziegler-Nichols 1 ($K_p = 31,89265$, $K_i = 0,119$, dan $K_d = 24,323$) mampu mencapai *setpoint* suhu 45°C dengan respon yang cepat. Namun demikian, pada awal respon terjadi *overshoot* menuju suhu sekitar 56°C sebelum akhirnya suhu menurun secara bertahap dan mulai mendekati nilai *setpoint*. Grafik ini menggambarkan bahwa kontrol PID memberikan reaksi yang cukup agresif di awal, tetapi mampu menstabilkan suhu menuju *setpoint* seiring waktu.



Gambar 4. 35 Grafik Implementasi Kontrol PID Ziegler Nichols 1
Sumber : Dokumen Pribadi Penulis

Berdasarkan grafik 4.35, kontrol PID menunjukkan respon awal yang sangat cepat dengan waktu naik (*rise time*) yang singkat. Namun, laju respon ini menyebabkan *overshoot* cukup besar, yaitu suhu mencapai puncak sekitar 56°C, atau $\pm 11^{\circ}\text{C}$ di atas *setpoint*. Hal ini menunjukkan bahwa akumulasi efek dari ketiga parameter (P, I, D) menghasilkan respon awal yang agresif terhadap perubahan.

Setelah mencapai puncaknya, suhu mengalami penurunan secara bertahap dan mulai mendekati nilai *setpoint*. Proses ini berlangsung sekitar menit ke-12, di mana suhu mulai berosilasi kecil di sekitar nilai *setpoint* 45°C, menandakan sistem mulai memasuki steady-state. Fluktuasi kecil yang masih terjadi disebabkan oleh respons korektif dari kontrol *integral* (I) yang terus menyesuaikan terhadap error sisa, serta kontrol derivatif (D) yang membantu meredam perubahan mendadak.

Meskipun awalnya terdapat *overshoot* yang tinggi, sistem tidak mengalami undershoot signifikan dan mampu memperbaiki diri secara progresif. Hal ini menunjukkan bahwa kontrol PID berhasil memberikan kestabilan jangka panjang, meskipun pada awal respon terjadi lonjakan yang besar. Adanya komponen derivatif sangat membantu mempercepat peredaman osilasi dan mencegah fluktuasi yang lebih besar, sementara komponen *integral* berperan dalam menghilangkan *error steady-state*.

Secara keseluruhan, kontrol PID tidak memberikan performa terbaik dibandingkan metode lainnya. Sistem mampu mengoreksi error dengan cepat dan konsisten, serta menjaga suhu tetap mendekati *setpoint* dengan stabilitas yang lebih tinggi. Meskipun dibutuhkan waktu beberapa menit untuk menstabilkan sistem pasca *overshoot*, kontrol PID menunjukkan kompensasi korektif yang efektif terhadap perubahan suhu, menjadikannya metode yang optimal untuk proses dengan kebutuhan presisi tinggi.

Tabel 4. 10 Tabel Data Pengujian Parameter PID

| Pengujian | Waktu Produksi Gas (menit) | Waktu Produksi Gas (jam:menit) |
|-----------|----------------------------|--------------------------------|
| 1 | 68 | 1 jam 8 menit |
| 2 | 70 | 1 jam 10 menit |
| 3 | 72 | 1 jam 12 menit |

Dari perolehan data pengujian diatas, maka diperoleh nilai rata-rata dari waktu yang dibutuhkan pada alat HHO Generator dengan metode menggunakan parameter PID untuk memenuhi wadah plastik dengan persamaan berikut.

$$\text{rata - rata waktu} = \frac{68+70+72}{3} = 70 \text{ menit atau 1 jam 10 menit.}$$

Dari perhitungan nilai rata-rata waktu data pengujian diatas, maka diperoleh nilai rata-rata dari waktu yang dibutuhkan pada alat HHO Generator dengan metode menggunakan parameter PID untuk memenuhi wadah plastik selama 1 jam 10 menit.

4.6 Hasil Perbandingan Produksi Gas

Setelah melakukan implementasi parameter PID Ziegler-Nichols 1 oarameter yang paling sesuai dan dapat menampilkan respon grafik secara stabil dan signifikan adalah parameter P-D Ziegler Nichols 1. Dengan menggunakan parameter P-D volume pada wadah plasatik dapat terpenuhi dengan rata-rata waktu 58 menit. Dengan waktu 58 menit maka diperoleh nilai debit aliran gas dengan persamaan berikut :

$$\text{Volume Wadah} = \pi \times r^2 \times h \quad 4.(16)$$

Berikut adalah keterangan dari persamaan diatas :

π : bernilai 3,14

r : Jari-jari wadah

h : Tinggi wadah

$$\text{Volume Wadah} = 3,14 \times 3^2 \times 20$$

$$\text{Volume Wadah} = 565,2 \text{ cm}^3$$

Dengan diketahuinya volume wadah plastik, debit aliran gas dapat diketahui dengan persamaan berikut :

$$Q = \frac{V (\text{Volume})}{t (\text{waktu})} \quad 4.(17)$$

Berikut adalah keterangan dari persamaan diatas :

Q : Debit aliran gas

V : Volume plastik

t : Waktu produksi gas

$$Q = \frac{565,2}{58 \text{ menit}} = \frac{565,2 \text{ cm}^3}{3480 \text{ s}}$$

$$Q = 0,1624 \text{ cm}^3/\text{s}$$

Dengan diperolehnya nilai debit menggunakan kontrol P-D Ziegler Nichols 1 maka diperoleh perbandingan antara sistem HHO Generator yang dioperasikan dengan mode manual atau tanpa kontrol PID dengan mode auto atau menggunakan

kontrol PID. Perbandingan ini menunjukkan bahwa dengan metode kontrol PID Ziegler Nichols 1 diperoleh debit lebih besar daripada tidak menggunakan kontrol PID dengan debit sebesar 0,1624 cm³/s atau 0,1624 ml/s. Dalam percobaan ini kontrol PID yang digunakan dapat mempengaruhi suhu dengan efektif untuk menghasilkan produksi gas yang lebih banyak.

Selain membandingkan dengan sistem HHO Generator pada mode manual, peneliti juga melakukan perbandingan antara hasil produksi gas sistem HHO Generator mode otomatis atau dengan kontrol PID dengan hasil produksi gas sistem HHO Generator Rafi Akbar (2024). Pada penelitian Rafi Akbar (2024), debit yang dihasilkan adalah 0,063 cm³/s atau setara 0,063 ml/s. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa sistem HHO Generator dengan dilengkapi kontrol PID dapat menyebabkan hasil debit yang lebih banyak dan lebih efektif dalam menghasilkan gas hidrogen. Berikut adalah tabel perbandingan antara mode manual, mode otomatis, dan hasil peneliti terdahulu Rafi Akbar (2024).

Tabel 4. 11 Perbandingan Hasil Produksi Gas

| No. | Parameter | Rafi Akbar (2024) | Mode Manual | Mode Otomatis |
|-----|------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 1. | Ukuran Plat Elektroda | (15cm×4cm×2mm) sebanyak 12 plat | (15cm×4cm×2mm) sebanyak 12 plat | (15cm×4cm×2mm) sebanyak 12 plat |
| 2. | Konsentrasi Katalis | 0,05M (2,81 gram) | 0,05M (2,81 gram) | 0,05M (2,81 gram) |
| 3. | Suhu Tabung Elektrolizer | Tidak diukur | Fluktuatif (28- 44°C) | Stabil 45 °C |
| 4. | Debit gas yang dihasilkan | 0,063 cm ³ /s | 0,1207 cm ³ /s | 0,1624 cm ³ /s |

Berdasarkan tabel perbandingan, seluruh mode menggunakan ukuran plat elektroda yang sama yaitu 15 cm × 4 cm × 2 mm dengan jumlah sebanyak 12 plat. Hal ini menunjukkan bahwa parameter fisik elektroda dibuat konstan agar hasil perbandingan lebih objektif dan fokus pada variabel metode pengendalian sistem. Pada parameter konsentrasi katalis, seluruh metode menggunakan larutan dengan konsentrasi 0,05 M atau setara dengan 2,81 gram. Kesamaan ini menunjukkan bahwa variasi hasil yang terjadi bukan disebabkan oleh perubahan komposisi elektrolit, melainkan lebih dominan oleh sistem kontrol suhu yang digunakan.

Perbedaan signifikan terlihat pada pengukuran suhu tabung elektrolizer. Penelitian Rafi Akbar tidak mencantumkan data suhu, sehingga sulit untuk mengukur efisiensi termal sistem tersebut. Pada mode manual, suhu bersifat fluktuatif dengan rentang antara 28 hingga 44 °C, yang menunjukkan bahwa sistem

belum mampu menjaga kestabilan suhu secara optimal. Sementara itu, pada mode otomatis, suhu mampu dijaga stabil di sekitar 45 °C. Ini menjadi keunggulan dari sistem otomatis, karena suhu yang stabil dapat meningkatkan efisiensi reaksi elektrolisis.

Dari sisi debit gas yang dihasilkan, sistem otomatis mencatat debit tertinggi yaitu sebesar 0,1624 cm³/s, disusul oleh mode manual sebesar 0,1207 cm³/s, dan penelitian Rafi Akbar yang hanya menghasilkan 0,063 cm³/s. Hal ini memperkuat kesimpulan bahwa pengaturan suhu yang stabil melalui kontrol otomatis memberikan pengaruh positif terhadap peningkatan produksi gas HHO.

4.7 Efisiensi Waktu Hasil Produksi Gas

Efisiensi waktu dalam proses produksi gas hidrogen dihitung dengan membandingkan waktu yang dibutuhkan antara mode manual dan mode otomatis menggunakan kontrol P-D Ziegler Nichols. Dengan debit aliran gas yang lebih tinggi pada mode otomatis, dihasilkan waktu produksi menjadi lebih singkat untuk menghasilkan volume gas yang sama seperti pada tabel 4.7.

Tabel 4. 12 Tabel Hasil Pengujian

| No. | Parameter | Mode Manual | Mode Otomatis |
|-----|---------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 1. | Ukuran Plat Elektroda | (15cm×4cm×2mm) sebanyak 12 plat | (15cm×4cm×2mm) sebanyak 12 plat |
| 2. | Konsentrasi Katalis | 0,05M (2,81 gram) | 0,05M (2,81 gram) |
| 3. | Suhu Tabung Elektrolizer | Fluktuatif (28-44°C) | Stabil 45 °C |
| 4. | Debit gas yang dihasilkan | 0,1207 cm ³ /s | 0,1624 cm ³ /s |
| 5. | Waktu produksi gas | 1 jam 18 menit (4680 s) | 58 menit (3840 s) |

Persamaan nilai efisiensi dapat dilihat pada persamaan 4.(18) berikut :

$$\eta \text{ waktu} = \frac{t_{\text{manual}} - t_{\text{otomatis}}}{t_{\text{manual}}} \times 100\% \quad 4.(18)$$

berikut adalah keterangan dari persamaan diatas :

η waktu : Efisiensi Waktu

t manual : Waktu mode manual

t otomatis : Waktu mode otomatis

$$\eta \text{ waktu} = \frac{4680s - 3840s}{4680s} \times 100\%$$

$$\eta \text{ waktu} = \frac{1200s}{4680s} \times 100\% = 25,64 \%$$

Dari hasil perhitungan diperoleh efisiensi waktu sebesar 25,64%. Artinya, dengan menerapkan kontrol P-D Ziegler Nichols, waktu yang dibutuhkan untuk menghasilkan volume gas hidrogen sebesar 565,2 cm³ dapat dipersingkat sekitar 25% dibandingkan proses secara manual. Peningkatan efisiensi ini menunjukkan bahwa kontrol otomatis mampu mempercepat proses produksi gas tanpa mengubah volume yang dihasilkan, sehingga lebih efisien dari segi waktu dan potensi operasional. Selain itu, peningkatan efisiensi waktu ini juga dapat berdampak pada efisiensi energi dan produktivitas sistem secara keseluruhan.

Namun, jika dilihat dari sudut pandang efisiensi dan kestabilan sistem, mode manual memiliki keterbatasan dalam menjaga suhu tetap berada pada titik kerja yang paling optimal. Tidak adanya umpan balik dari sensor suhu ke sistem pengendali menyebabkan operator harus terus melakukan pengamatan dan penyesuaian secara manual, yang tentu saja tidak praktis untuk sistem yang bekerja dalam jangka waktu lama atau pada kondisi lingkungan yang berubah-ubah. Hal ini dapat menyebabkan konsumsi energi menjadi kurang efisien atau bahkan overheat jika tidak dikontrol dengan baik.

Selain itu, grafik ini juga memberikan gambaran bahwa meskipun suhu berhasil distabilkan, nilai suhu stabil tersebut tidak selalu sesuai dengan suhu ideal yang diinginkan dalam proses elektrolisis. Dalam penelitian ini, suhu sekitar 40°C mungkin sudah mencukupi untuk proses produksi gas HHO, namun pada skenario aplikasi lain bisa saja dibutuhkan suhu yang lebih rendah atau lebih tinggi. Oleh karena itu, mode manual lebih cocok digunakan pada tahap awal eksperimen atau pengujian awal sistem, sementara untuk aplikasi yang lebih serius dan berkelanjutan, mode otomatis dengan kendali tertutup jauh lebih disarankan agar proses berjalan lebih konsisten, aman, dan efisien.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dengan merujuk pada serangkaian eksperimen dan uji coba yang telah direalisasikan serta didokumentasikan dalam Tugas Akhir berjudul “Optimasi Sistem Elektrolisis HHO Generator Menggunakan Kontrol PID untuk Meningkatkan Efisiensi Produksi Hidrogen,” maka dapat diberikan saran untuk pengembangan alat sebagai berikut:

1. Sistem kontrol PID terbukti mampu menjaga suhu tabung elektrolizer dalam rentang optimal, dengan parameter PD yang ditentukan melalui metode Ziegler-Nichols 1. Dengan nilai $K_p = 42.52353$ dan $K_d = 24.323$. Dengan parameter kontrol ini, sistem menunjukkan karakteristik respon cepat dengan waktu mencapai *setpoint* sekitar menit ke-5, tanpa adanya *overshoot* yang mencolok yaitu 2,5%. Sistem secara otomatis mampu merespons perubahan suhu secara *real-time* sehingga kestabilan suhu lebih terjaga dibandingkan tanpa kontrol.
2. Penggunaan kontrol PID menunjukkan peningkatan produksi hidrogen yang signifikan dibandingkan tanpa kontrol. Ini disebabkan oleh kestabilan suhu yang memungkinkan laju reaksi elektrolisis lebih konsisten dan efisien dengan debit yang dihasilkan 0,1624 cm³/s menghasilkan gas hidrogen yang lebih tinggi daripada mode manual.
3. Prototipe yang dikembangkan mampu bekerja secara otomatis dan terintegrasi, dilengkapi dengan sensor suhu (PT100) dengan nilai rata-rata error 1,84%, sensor tegangan dengan nilai rata-rata error senilai 2,26%, sensor arus dengan nilai rata-rata error senilai 0,2%, dan sensor gas (MICS-5524) dengan nilai rata-rata error senilai 2,20%, serta sistem aktuasi berbasis PWM. Berdasarkan nilai dari sensor diatas dapat disimpulkan bahwa sistem dapat berjalan dengan efisien.
4. Efisiensi waktu produksi meningkat secara signifikan dengan adanya kontrol PID, sebagaimana ditunjukkan oleh perbandingan antara waktu produksi sebelum dan sesudah optimasi. Sistem dengan kontrol PID mampu mempercepat pencapaian volume hidrogen yang sama dalam waktu yang lebih

singkat dengan efisiensi sebesar 25% yaitu dengan percepatan waktu selama 1200 s.

5.2 Saran

Dengan merujuk pada serangkaian eksperimen dan uji coba yang telah direalisasikan serta didokumentasikan dalam Tugas Akhir berjudul “Optimasi Sistem Elektrolisis HHO Generator Menggunakan Kontrol PID untuk Meningkatkan Efisiensi Produksi Hidrogen”, dapat diberikan saran untuk melakukan pengembangan alat sebagai berikut:

1. Meningkatkan perancangan *hardware* terutama pada sensor dan aktuator, dikarenakan hal ini dapat mempengaruhi terhadap kinerja sistem keseluruhan secara signifikan.
2. Menggunakan penerapan metode lain untuk meningkatkan efisiensi dari sistem elektrolisis, agar hasil produksi gas dapat lebih optimal.
3. Menggunakan cara atau metode lain dalam melakukan pengukuran hasil gas. Baik dari debit, massa, maupun volume gas. Agar nilai gas lebih valid dan terukur.

DAFTAR PUSTAKA

- Afandi, Y., & Jamaaluddin, J. (2021). Android-Based Remote *Control* Solar Power Plant Panels with Direct *Current* System Installation. *Procedia of Engineering and Life Science*, 1(2). <https://doi.org/10.21070/pels.v1i2.976>
- Alviero, A. L., & Setiawan Nugroho, D. (2023). Pengaplikasian Sensor Arus ACS712 Sebagai Sistem Proteksi Pada Alat Penghitung Kertas Otomatis Berbasis IoT. *Metrotech (Journal of Mechanical and Electrical Technology)*, 2(1), 7–13. <https://doi.org/10.33379/metrotech.v2i1.2067>
- Budiyanto, A., Pramudita, G. B., & Adinandra, S. (2020). Kontrol Relay dan Kecepatan Kipas Angin Direct *Current* (DC) dengan Sensor Suhu LM35 Berbasis Internet of Things (IoT). *Techné : Jurnal Ilmiah Elektroteknika*, 19(01), 43–54. <https://doi.org/10.31358/techne.v19i01.224>
- Fahruri, H. W., Aribowo, W., Widyartono, M., & Hermawan, A. C. (2021). *MONITORING ARUS, TEGANGAN, DAN SUHU PADA PROTOTYPE THERMOELECTRIC GENERATOR BERBASIS IoT*. 10.
- Fazlunnazar, M., Hakim, L., Meriatna, M., & Sulhatun, S. (2020). PRODUKSI GAS HIDROGEN DARI AIR LAUT DENGAN METODE ELEKTROLISIS MENGGUNAKAN ELEKTRODA TEMBAGA DAN ALUMUNIUM (Cu DAN Al). *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 9(1), 58. <https://doi.org/10.29103/jtku.v9i1.3037>
- Gideon, S., & Fadhli, M. (2022). PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI PROTOTYPE SISTEM OTOMATISASI PADA SEL ELECTROLYZER PENGHASIL GAS BROWN (HHO). *Physics and Science Education Journal (PSEJ)*, 66–74. <https://doi.org/10.30631/psej.v2i2.1354>

Hamala, N. R. (t.t.). *FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS LAMPUNG BANDAR LAMPUNG 2023*.

Kusumah, H., & Pradana, R. A. (2019). PENERAPAN TRAINER INTERFACING MIKROKONTROLER DAN INTERNET OF THINGS BERBASIS ESP32 PADA MATA KULIAH INTERFACING. *Journal CERITA*, 5(2), 120–134. <https://doi.org/10.33050/cerita.v5i2.237>

Lubis, A. K., Yanie, A., & Sawitri, D. (2022). *DESAIN DAN PERANCANGAN ALAT PANTAU ENERGI LISTRIK DI RUMAH JARAK JAUH BERBASIS IoT*. 01(01).

Najafi, B., Haghighatshoar, F., Ardabili, S., S. Band, S., Chau, K. W., & Mosavi, A. (2021). Effects of low-level hydroxy as a gaseous additive on performance and emission characteristics of a dual fuel diesel engine fueled by diesel/biodiesel blends. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 15(1), 236–250. <https://doi.org/10.1080/19942060.2021.1871960>

Natsir, M., Rendra, D. B., & Anggara, A. D. Y. (2019). *IMPLEMENTASI IOT UNTUK SISTEM KENDALI AC OTOMATIS PADA RUANG KELAS DI UNIVERSITAS SERANG RAYA*. 6(1).

Nurrahma, S., Berbudi, T. A., Firdaus, M. R., Izzaulhaq, G., & Hudati, I. (2023). Implementasi Kontrol PID pada Kopel Motor DC dengan Menggunakan Filter Kalman. *Jurnal Listrik, Instrumentasi, dan Elektronika Terapan*, 4(1). <https://doi.org/10.22146/juliet.v4i1.82150>

Pranata, A. (2021). Automatic Scroll Saw System Dengan Teknik Kendali Kecepatan Pulse Width Modulation (PWM) Berbasis Arduino UNO. *J-*

- SISKO TECH (Jurnal Teknologi Sistem Informasi dan Sistem Komputer TGD)*, 4(1), 69. <https://doi.org/10.53513/jsk.v4i1.2602>
- Priambudi, R. W., & Kurniawan, W. D. (2021). *ANALISA SISTEM PENGENDALIAN TEMPERATUR BERBASIS ARDUINO UNO PADA PROTOTIPE TABUNG REAKTOR*. 10.
- Putra, C. S. (2024). Sistem Kontrol Dan Monitoring Hidrogen—Oksigen (HHO) Generator Berbasis Internet Of Things (IoT). *Jurnal Riset, Inovasi, Teknologi & Terapan*, 2(2), 46. <https://doi.org/10.30811/ristera.v2i2.5467>
- Putra, G. N. E., & Nulhakim, L. (2023). *Otomatisasi Perangkat Tikus Menggunakan Sensor HC-SR04 Berbasis Arduino Uno*. 2.
- Putri, M. D. I., Ma'arif, A., & Puriyanto, R. D. (2022). *PENGENDALI KECEPATAN SUDUT MOTOR DC MENGGUNAKAN KONTROL PID DAN TUNING ZIEGLER NICHOLS*. 23(1).
- Reski Ramadhan, M. (2023). Rancang Bangun Box Pengering Sepatu Berbasis Mikrokontroler. *Electrician: Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, 17(3), 292–297. <https://doi.org/10.23960/elc.v17n3.2544>
- Rofiq, A. (t.t.). *RANCANG BANGUN ALAT PEMANTAU VOLUME FLOK DAN SUHU AIR KOLAM IKAN BIOFLOK BERBASIS IOT UNTUK MENDUKUNG KETAHANAN PANGAN 4.0*.
- Rafi Akbar, (2024). *PERANCANGAN DAN PROSES FABRIKASI HIDROGEN GENERATOR UNTUK PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC) DENGAN VARIASI KATALIS KOH, NaCl, DAN NaOH SERTA PENAMBAHAN KONSENTRASI KATALIS*

Samsugi, S., Gunawan, R. D., Thyo, A., & Prastowo, A. T. (2022). *PENERAPAN PENJADWALAN PAKAN IKAN HIAS MOLLY MENGGUNAKAN MIKROKONTROLER ARDUINO UNO DAN SENSOR RTC DS323*. 03(02).

Sebbahi dkk., 2022. *Alkaline Water Electrolysis, Proton Exchange Membrane and Solid-Oxide Electrolysis*

Sulaeman, W., Alimudin, E., & Sumardiono, A. (2022). *SISTEM PENGAMAN LOKER DENGAN MENGGUNAKAN DETEKSI WAJAH*. 03(02).

LAMPIRAN

Lampiran 1. Biodata Mahasiswa

BIODATA MAHASISWA



1. Nama : Maulana Syarif Hidayatullah
2. NRP : 0921040022
3. Program Studi : D4 Teknik Otomasi
4. Agama : Islam
5. Status : Belum Menikah
6. Alamat Asal : Jl. Letnan Sudibyo HI No.28, Bogo, Nganjuk
7. Nomor Telepon : 085964226855
8. Jenis Kelamin : Laki-Laki
9. Email : msyarif21@student.ppns.ac.id
10. Tempat, Tanggal Lahir : Nganjuk, 21 September 2002
11. Riwayat Pendidikan :

| PENDIDIKAN FORMAL | | | |
|-------------------|-------------|--|---|
| Pendidikan | Tahun | Tempat Pendidikan | Jurusan |
| Diploma 4 | 2021 – 2025 | Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya | Teknik Otomasi |
| SMK | 2018 – 2021 | SMAN 2 Nganjuk | Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam |
| SMP | 2015 – 2018 | SMP Islam Baitul Izzah Nganjuk | - |
| SD | 2009 - 2015 | SDIT Baitul Izzah Nganjuk | - |