

Electrocoagulation System Using a Synchronous Buck Converter with PI Control in Domestic Wastewater Treatment

Sistem Elektrokoagulasi Menggunakan Converter Buck Sinkron dengan Kontrol PI pada Pengolahan Limbah Domestik

Aruwanto Hidayat ¹⁾, Syamsudduha Syahririni ²⁾

¹⁾ Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

²⁾ Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

*Email Penulis Korespondensi: syahririni@umsida.ac.id

Abstract. *This study develops an electrocoagulation system using a PI-controlled synchronous buck converter and fuzzy logic for efficient domestic wastewater treatment. The system is designed to optimize power efficiency through adaptive voltage regulation (12-40V) based on feedback from pH, TDS, turbidity, and temperature sensors. Test results demonstrate that the synchronous buck converter achieves up to 94% efficiency at heavy load (10Ω), with average efficiency of 87-90% during system operation. At light loads (33Ω), efficiency drops to 48-73% due to increased power losses. The system successfully reduces turbidity by 32-56% (from 100 NTU to 44-68 NTU), stabilizes pH within 7.47-8.17 range, and decreases TDS by 15.3% (from 795.3 ppm to 673.6 ppm).*

Keywords – electrocoagulation; synchronous buck converter; PI control; domestic wastewater; fuzzy logic; monitoring

Abstrak Penelitian ini mengembangkan sistem elektrokoagulasi berbasis konverter buck sinkron dengan kontrol PI dan fuzzy logic untuk pengolahan limbah domestik secara efisien. Sistem ini dirancang untuk mengoptimalkan efisiensi daya melalui regulasi tegangan adaptif (12-40V) berdasarkan umpan balik sensor pH, TDS, kekeruhan, dan suhu. Hasil pengujian menunjukkan bahwa konverter buck sinkron mampu mencapai efisiensi hingga 94% pada beban tinggi (10Ω), dengan efisiensi rata-rata 87-90% selama pengoperasian sistem. Pada beban ringan (33Ω), efisiensi turun menjadi 48-73% karena meningkatnya rugi-rugi daya. Sistem berhasil mengurangi kekeruhan sebesar 32-56% (dari 100 NTU menjadi 44-68 NTU), menstabilkan pH pada rentang 7.47-8.17, serta menurunkan TDS sebesar 15.3% (dari 795.3 ppm menjadi 673.6 ppm).

Kata Kunci – elektrokoagulasi; konverter buck sinkron; kontrol PI; limbah domestik; fuzzy logic; monitoring

I. PENDAHULUAN

Sebagian besar masyarakat, baik di kawasan perumahan maupun pedesaan, masih membuang limbah cair domestik secara langsung tanpa pengolahan yang memadai. Limbah ini berasal dari aktivitas rumah tangga seperti mencuci pakaian, memasak, dan mandi, ketika tidak dikelola sesuai prosedur pengolahan limbah dengan baik maka dapat menyebabkan pencemaran air serta berdampak buruk bagi ekosistem dan kesehatan manusia [1].

Limbah domestik sebelum dibuang ke lingkungan harus memenuhi standar baku mutu air yang telah ditetapkan. Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.68/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016, pH limbah yang dibuang harus berada dalam kisaran 6 hingga 9 [2]. Selain itu, Keputusan Menteri Kesehatan Nomor 907 Tahun 2002 menetapkan bahwa kekeruhan air yang memenuhi syarat air bersih harus di bawah 5 NTU, sedangkan Total Dissolved Solids (TDS) tidak boleh melebihi 1000 mg/L [3]. Oleh karena itu, sebelum dibuang, limbah domestik harus melalui pengolahan yang efektif agar sesuai dengan standar baku mutu.

Elektrokoagulasi (EC) menjadi salah satu metode yang efektif dalam proses mengelolah limbah, yang bekerja berdasarkan prinsip pemberian arus listrik untuk memicu reaksi kimia dalam air, sehingga sebagian besar polutan seperti partikel terlarut, bakteri, virus, logam, hidrokarbon, dan senyawa organik dapat diendapkan [1].

Berdasarkan penelitian Terdahulu menggunakan filtrasi multimedia dengan Elektrokoagulasi untuk proses penjernihan air dengan pengaturan tegangan 0-12 volt dan arus 1-30 Amper secara manual didapatkan waktu pengolahan

yang bervariasi dari 15 menit hingga 60 menit besar tegangan dan lama proses mempengaruhi kualitas limbah yang diolah ketika tingkat kandungan limbah semakin pekat maka proses menjadi semakin lama dan harus melakukan pengaturan tegangan dan arus manual jika ingin proses pengolahan limbah menjadi cepat[4]. Oleh karena itu, diperlukan sistem yang mampu mengatur daya secara adaptif agar lebih efisien dan optimal dalam menurunkan parameter pencemar dalam air limbah.

Untuk mengatasi permasalahan ini, digunakan konverter buck sinkron yang memiliki efisiensi tinggi dalam penyediaan daya untuk elektroda elektrokoagulasi[5]. konverter buck sinkron merupakan jenis konverter DC-DC yang dapat mengontrol tegangan keluaran dengan presisi, sehingga memungkinkan pengaturan daya yang lebih efisien dalam sistem elektrokoagulasi [6]. Selain itu, penerapan kontrol PI (Proportional-Integral) dalam sistem ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas pengaturan tegangan, keandalan, serta efisiensi konversi daya, sehingga konsumsi energi dapat lebih dioptimalkan [7].

Sebagai tambahan, untuk memastikan bahwa kualitas air hasil dari pengolahan sudah memenuhi standar baku mutu, sistem kontrol berbasis fuzzy logic mamdani diterapkan[8]. Fuzzy logic memungkinkan sistem melakukan evaluasi terhadap parameter pH, TDS, kekeruhan, dan suhu, serta menentukan apakah air hasil pengolahan sudah sesuai dengan standar. Output dari fuzzy logic ini berupa tegangan DC yang berkisar antara 12 hingga 40 volt, yang digunakan untuk mengontrol daya yang diberikan pada elektroda elektrokoagulasi. Dengan pendekatan ini, sistem dapat secara otomatis menyesuaikan daya sesuai dengan karakteristik air limbah yang masuk, tanpa memerlukan seting manual yang jika terjadi perubahan kadar limbah.

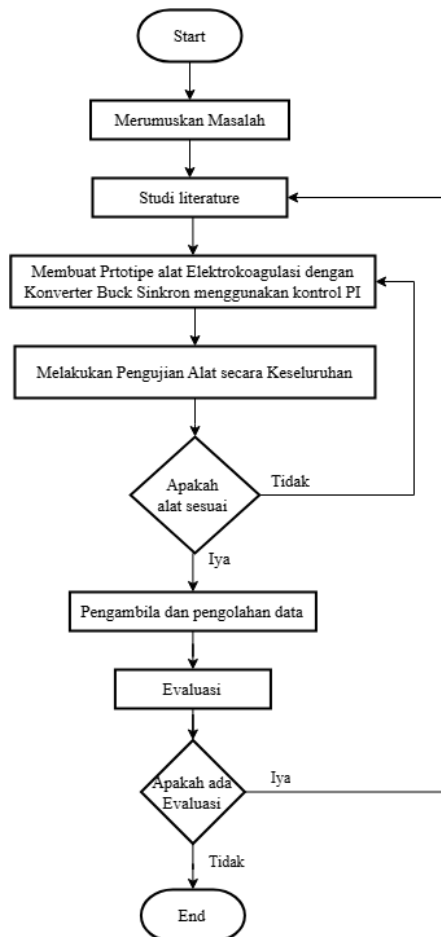
Metode Jarrest dapat menjadi salah satu metode pengolahan untuk mengelola dan menguji air bersih dan limbah [9], yang bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas sistem elektrokoagulasi dalam menurunkan parameter pencemar seperti pH, TDS, dan kekeruhan. Pengujian ini juga digunakan untuk menilai konsumsi daya serta efisiensi energi dari sistem yang telah dikembangkan. Dengan menerapkan konverter buck sinkron dengan kontrol PI serta sistem fuzzy logic, diharapkan dapat diperoleh peningkatan efisiensi dalam konsumsi daya, pengurangan penggunaan bahan kimia, serta efektivitas dalam menurunkan kadar pencemar dalam limbah domestik agar sesuai dengan standar baku mutu yang telah ditetapkan.

II. METODE

A. Metode Penelitian

Penelitian ini mengimplementasikan sistem elektrokoagulasi dengan konverter buck sinkron yang dikendalikan oleh kontrol PI menggunakan metode R&D (Research and Development). Metode R&D melibatkan proses eksperimen untuk menguji komponen dan kinerja sistem secara keseluruhan. Melalui serangkaian pengujian,

Perbaikan, dan finalisasi, sehingga dihasilkan sistem yang optimal sesuai dengan tujuan penelitian [10], Tahapan penelitian yang akan dilakukan dapat dilihat pada Gambar 1.

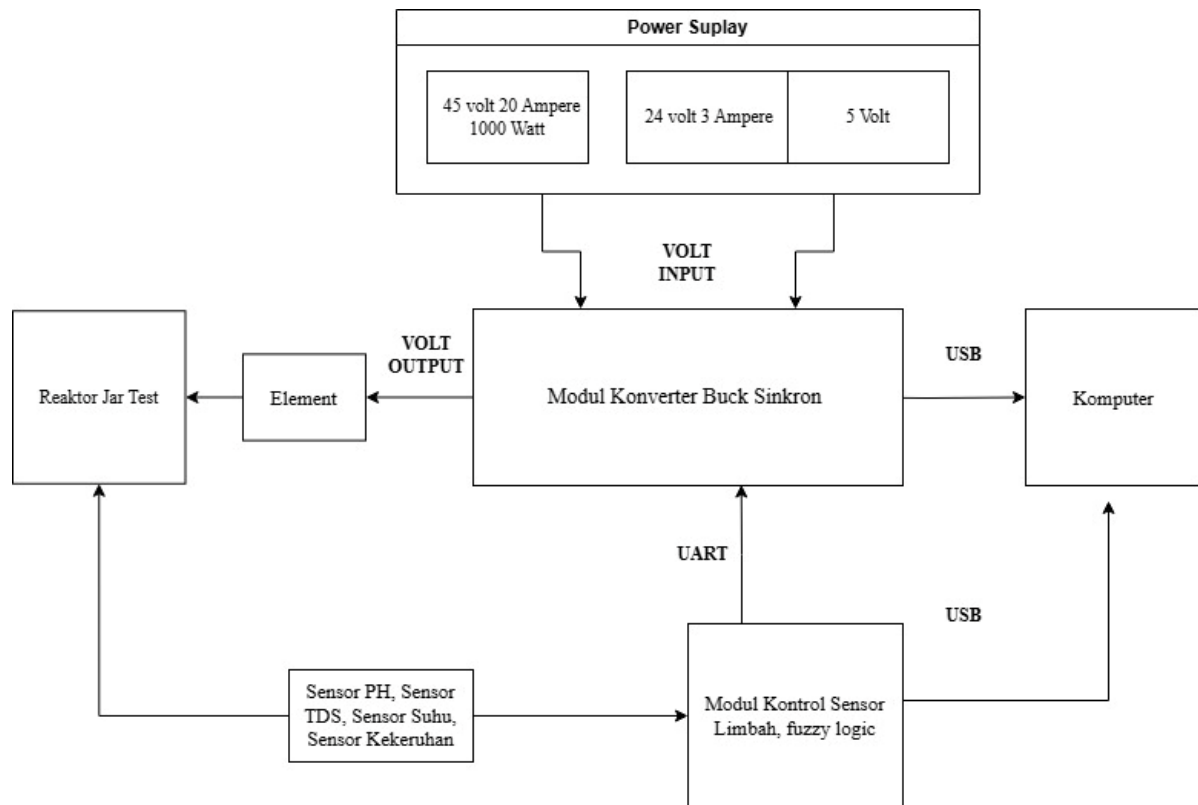


Gambar 1. Tahapan Penelitian

B. Perancangan System Elektrokoagulasi Menggunakan Converter Buck sinkron dengan Kontrol PI

Merancang sistem elektrokoagulasi dengan Converter Buck Sinkron dan kontrol PI berdasarkan prinsip-prinsip yang ditemukan dari studi literatur. Pada Gambar 2. Sistem Elektrokoagulasi dengan Converter Buck Sinkron dan kontrol PI untuk mengolah limbah domestik, dirancang memiliki 3 bagian utama yang pertama yaitu bagian converter buck sinkron dengan kontrol PI pada bagian block ini berfungsi untuk mengatur menaik dan menurunkan tegangan yang disuplay oleh block power suplay, pada bagian converter buck sinkron ini tegangan input dari block power suplay sebesar 45 volt akan diatur dalam rentang 12 volt hingga 40 volt berdasarkan input yang diumpangkan oleh block kontrol sensor, kontrol PI pada bagian ini berfungsi agar tegangan output akan sesuai dengan tegangan setpoint yang di beri oleh control sensor limbah selain itu block ini juga mengirim data arus tegangan dan nilai setpoint intuk dipantau melalui port USB ke komputer, output block converter buck sinkron dihubungkan pada elemen jartest sebagai suplay proses elektrokoagulasi.

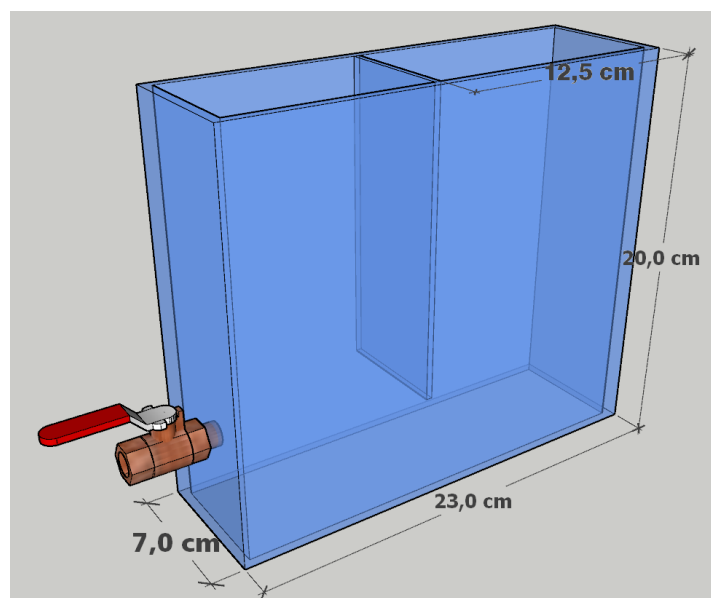
Pada bagaian kedua yaitu, block kontrol sensor memiliki fungsi untuk membaca nilai sensor yang akan dijadikan refrensi sistem mengenai kualitas limbah dalam proses menentukan kualitas limbah hasil baca sensor akan diproses dengan kontrol fuzzy logic untuk menghasilkan nilai kualitas kemudian dikonversi ke nilai tegangan 12-40 volt dan akan dikirim ke block konverter buck sinkron melalui serial monitor pada blok ini juag mengirimkan data baca sensor dan kualitas limbah ke komputer melalui port usb. Pada bagian terakhir adalah pada block power suplay berfungsi untuk memberi suplay pada sinkronus buck converter sebesar 45volt 1000w dan menyuplay tegangan 24 volt dan 5 volt untuk kebutuhan suplay microcontroller dan sensor.



Gambar 2. Blok Diagram Sistem Elektrokoagulasi Dengan konverter buck sinkron

C. Merancang Tempat Uji Jar Test

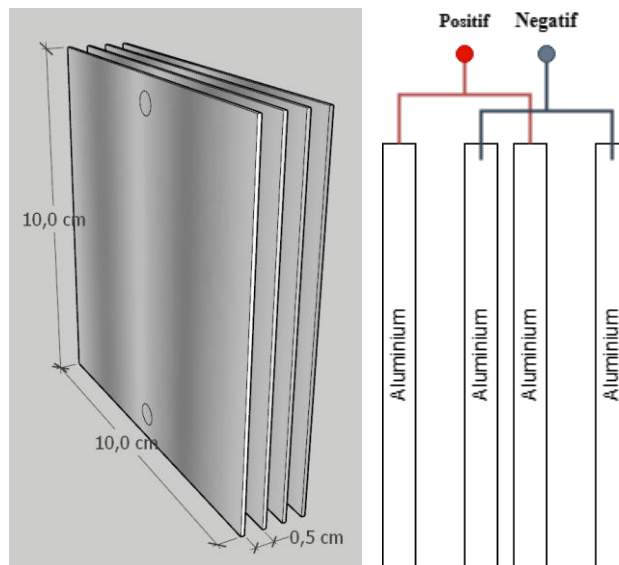
Tempat uji jar test yang dapat dilihat pada Gambar 3. didesain memiliki ukuran dengan panjang 23 cm, lebar 7 cm dan tinggi 20 cm, material tempat jartest di buat dari bahan Akrilik dan penambahan kran digunakan untuk pengambilan sampel limbah yang sudah di olah, dengan peletakan kran sedikit lebih tinggi dari dasar tempat jar test sehingga sluge tidak ikut terambil saat proses pengambilan sempel limbah yang sudah di olah.



Gambar 3. Desain Reaktor Jar test

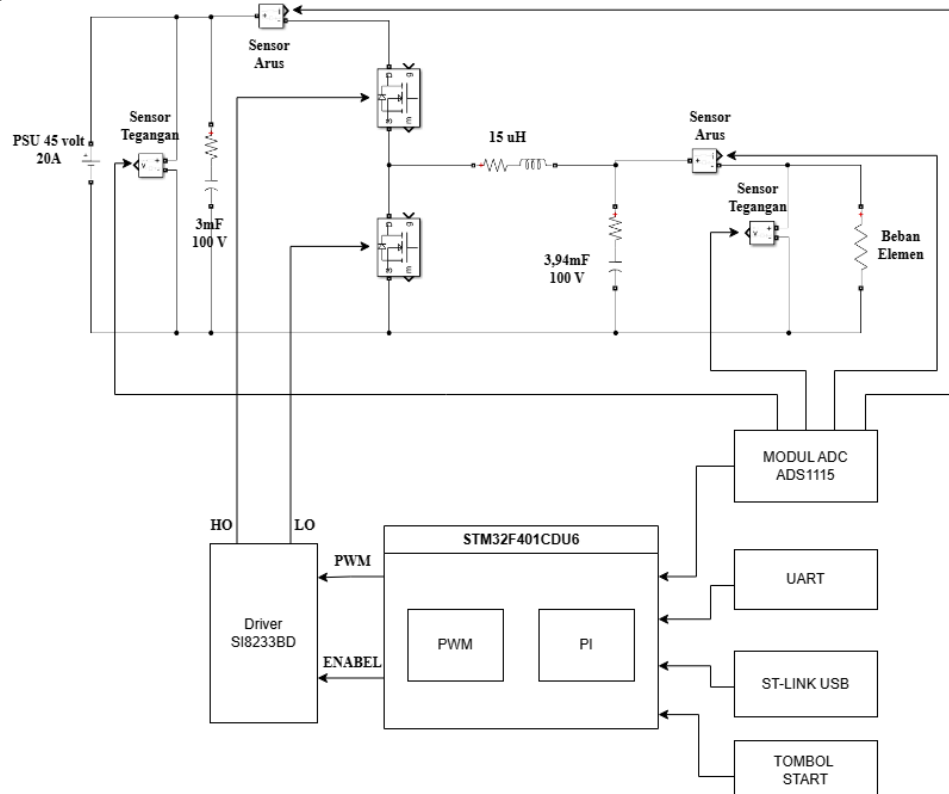
D. Merancang elemen dan model penyambungan electrode elektrokoagulasi

Sistem elektrokoagulasi yang menggunakan elektrode aluminium dengan konfigurasi pelat paralel terbukti efektif untuk pengolahan air[11]. Elemen elektro koagulasi dibuat dengan plat Aluminium dengan ukuran luas 10 cm x 10 cm dengan ukuran ketebalan 1 mm dan palat di susun dengan jarak 5 mm yang dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Desain dan wiring elemen elektrokoagulasi

E. Merancang Modul Konverter Buck sinkron



Gambar 5. Blok diagram konverter buck sinkron

Penggunaan konverter buck sinkron berfungsi mengatur tegangan input DC menjadi tegangan output DC yang lebih rendah menggunakan dua sakelar MOSFET yang dioperasikan secara bergantian. Perbedaan utama dengan konverter buck konvensional adalah penggunaan MOSFET sinkron pada posisi dioda, yang meningkatkan efisiensi dengan mengurangi kerugian [7], [10]. Rangkaian driver mosfet menggunakan ic SI8233, IC driver ini

mengggunakan standar iso yang support dengan tegangan masukan ttl dengan memiliki kemampuan arus 4 A [11]. Kontrol PI digunakan untuk mengatur tegangan output supaya sesuai dengan set point yang di berikan yaitu tegangan variasi 24 volt- 40 volt. Output kontrol PI digunkan untuk mengatur PWM duty cycle.

Tabel 1. Parameter desain synchronous buck converter

No	Parameter	Simbol	Target
1	Input Voltage	V_{in}	45 volt
2	Output Voltage	V_{out}	12 volt – 40 volt
3	Switching Frekuensi	F_{sw}	100 Khz
4	Inductor Current Rippel Ratio	LIR	0.3
5	Capasitor Voltage Rippel Ratio	CVR	0.04
6	Maximum Output Current	$I_{OUT, MAX}$	30 A
7	Output Voltage Max Overshoot	VOV	100 mV

Dilakukan perhitungan untuk menentukan nilai dutycycle yang nantinya akan digunakan untuk menyeting nilai maksimal dan minimal Kontrol PI.

$$\frac{t_{ON,HS}}{t_{ON,HS} + t_{OFF,HS}} \approx \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \quad (1)$$

$$D_{max} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{40}{45} = 0.888 = 88,8 \%$$

$$D_{min} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{24}{45} = 0.533 = 53,3\%$$

Menentukan nilai induktor Untuk memenuhi atau melebihi persyaratan arus ripple, induktansi harus lebih besar dari induktansi minimum yang dihitung, dan arus saturasi induktor harus lebih tinggi dari arus puncak konverter pada beban maksimum[12].

$$L_{MIN} = \frac{(V_{IN} - V_{OUT}) \cdot D}{LIR \cdot I_{OUT, MAX} \cdot F_{SW}} \quad (2)$$

$$L_{MIN} = \frac{(45 - 40) \cdot 0.888}{0.3 \cdot 25 \cdot (150 \times 10^3)}$$

$$L_{MIN} = \frac{4.44}{1125000} = 3.947 \times 10^{-6} H = 3.946 \mu H$$

Menghitung Arus puncak converter buck sinkron menggunakan persamaan 3.

$$I_{PEAK} = I_{OUT, MAX} \cdot \frac{\Delta I_L}{2} \quad (3)$$

$$I_{PEAK} = 25 + \frac{0.3 \times 25}{2} = 28,75 A$$

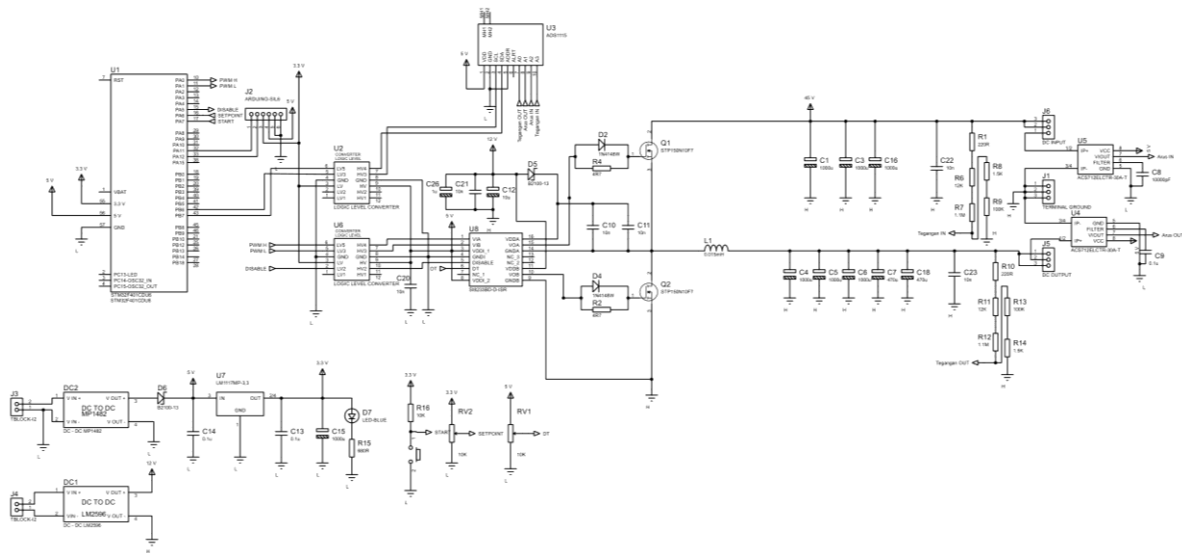
Menghitung Kapasitor minimal mendapatkan nilai 407,29 μF pada penerapannya menggunakan 3940 μF diharapkan dapat mengurangi tegangan ripple dan respons terhadap perubahan beban menggunakan persamaan 4[12].

$$C_{MIN} = \frac{L \times I_{PL}^2}{(V_{OV} + V_{OUT})^2 - V_{OUT}^2} \quad (4)$$

$$C_{MIN} = \frac{3.947 \times 10^{-6} \cdot 28.75^2}{(0.1 + 40)^2 - 40^2}$$

$$C_{MIN} = \frac{0.0032624421875}{1.608,01 - 1600} = 4,073 \times 10^{-4} F = 407,29 \mu F$$

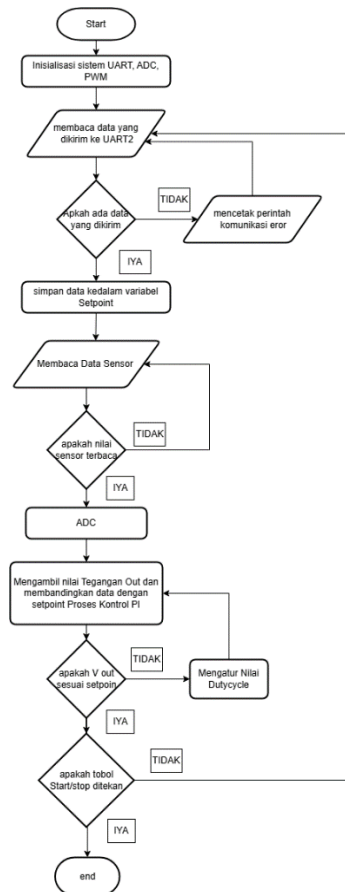
F. Scematic Modul Konverter Buck sinkron



Gambar 6. Schematic Converter Buck Sinkron

G. Flowchart Modul Konverter Buck sinkron

Flowchart yang diunggah menggambarkan cara kerja konverter buck sinkron dengan sistem kontrol berbasis feedback. Proses dimulai dengan inisialisasi komponen seperti UART, ADC, dan PWM. Sistem membaca data yang diterima melalui UART, memeriksa validitas data, dan menyimpan nilai setpoint jika data valid. Selanjutnya, nilai dari sensor diambil dan diperiksa apakah sesuai dengan rentang yang diinginkan. Jika nilai sensor valid, sistem menggunakan ADC untuk mengonversi sinyal analog menjadi digital dan membandingkan tegangan output dengan setpoint menggunakan kontrol PI untuk menentukan kesalahan. Jika tegangan output tidak sesuai, nilai duty cycle dihitung untuk mengatur tegangan output agar sesuai dengan setpoint. Proses ini berlanjut hingga tombol start/stop ditekan, yang menentukan apakah sistem melanjutkan atau menghentikan operasional.



Gambar 7. Flowchart diagram Converter Buck Sinkron

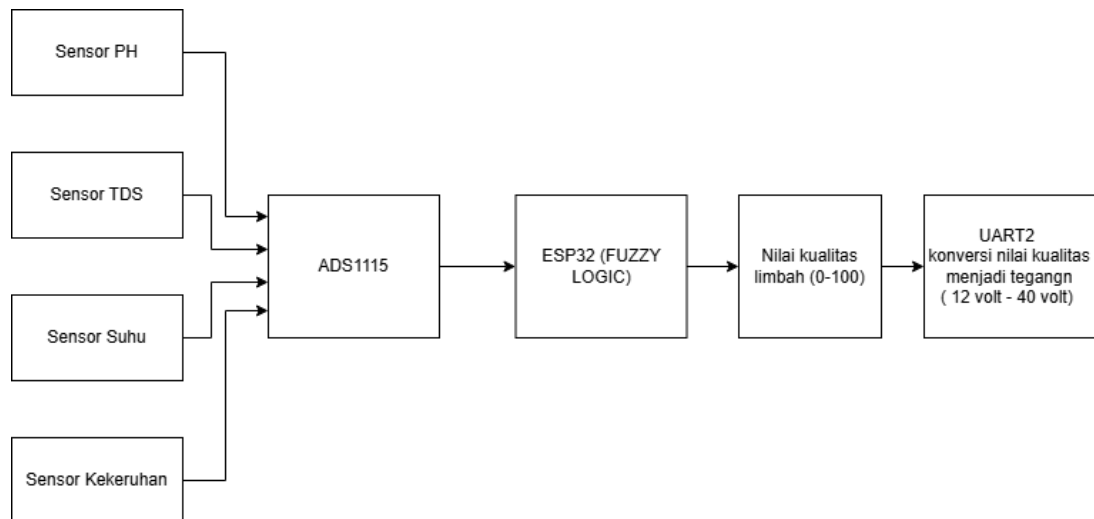
H. Tuning kontrol PI Konverter buck sinkron

Metode Ziegler-Nichols adalah salah satu cara untuk mentuning PID yang sangat umum digunakan untuk mengatur parameter kontroler agar mencapai respons yang optimal. Metode ini terdiri dari dua pendekatan: metode osilasi dan metode kurva reaksi[13]. Tuning kontrol PI berdasarkan metode Ziegler-Nichols dilakukan dengan memulai dengan menetapkan parameter T_i dan T_d menjadi nol, lalu secara bertahap meningkatkan nilai K_p hingga sistem menunjukkan osilasi atau ketidakstabilan yang berkelanjutan. Pada titik tersebut, akan diperoleh nilai **critical gain** (K_{cr}) dan **critical period** (P_{cr}). Berdasarkan nilai K_{cr} dan P_{cr} ini, rumus Ziegler-Nichols pada Tabel 2. digunakan untuk menentukan parameter K_p dan K_i untuk kontrol PI. Metode ini mempercepat proses tuning dibandingkan dengan metode trial and error tradisional, karena hanya memerlukan penyesuaian pada K_p [14].

Tabel 2. Contoh tabel aturan dasar Ziegler-Nichols [14].

Tipe Kontroler	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45 K_{cr}$	$\frac{1}{1.2} P_{cr}$	0
PID	$0.6 K_{cr}$	$0.5 P_{cr}$	$0.125 P_{cr}$

I. System Modul Kontrol Sensor Limbah

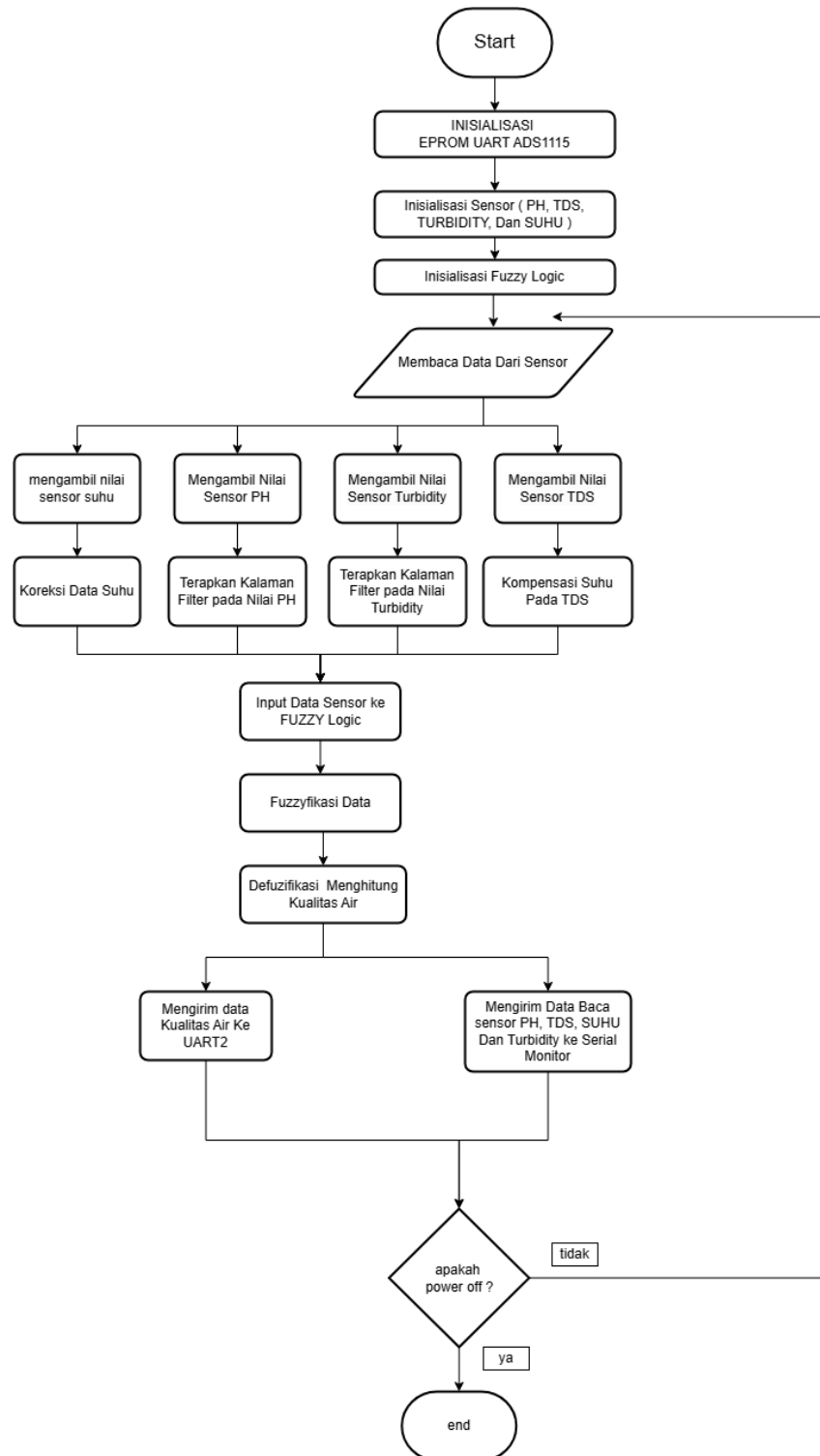


Gambar 8. Diagram Sistem Modul Kontrol Sensor Limbah

Pada Modul Kontrol Sensor Limbah terdiri dari sensor PH, Sensor TDS, sensor suhu kedap air menggunakan DS18B20 memiliki rentang kerja pada suhu -55 °C sampai 125 °C[15], dan sensor kekeruhan, kemudian di hubungkan pada modul ADS1115 untuk Merubah Sinyal analog ke digital signal digital kemudian di proses oleh Microcontroler ESP32 dengan Kontrol Fuzzy untuk menghasilkan nilai kualitas limbah nilai kualitas limbah diberi nilai 1- 100 semakin tinggi nilai maka semakin bagus, setelah didapat nilai kualitas limbah maka akan di konversi menjadi 12 volt hingga 40 volt yang akan dikirim ke synchronus buck converter.

pada sensor kekeruhan dilakukan pengecualian didalam rule fuzzy dikarenakan limbah akan dilakukan proses filtrasi setelah proses elektrokoagulasi. Jadi yang msauk dalam penentuan kualitas limbah hanya sensor PH, TDS, dan Suhu.

J. Flowchart Modul Control Sensor Limbah



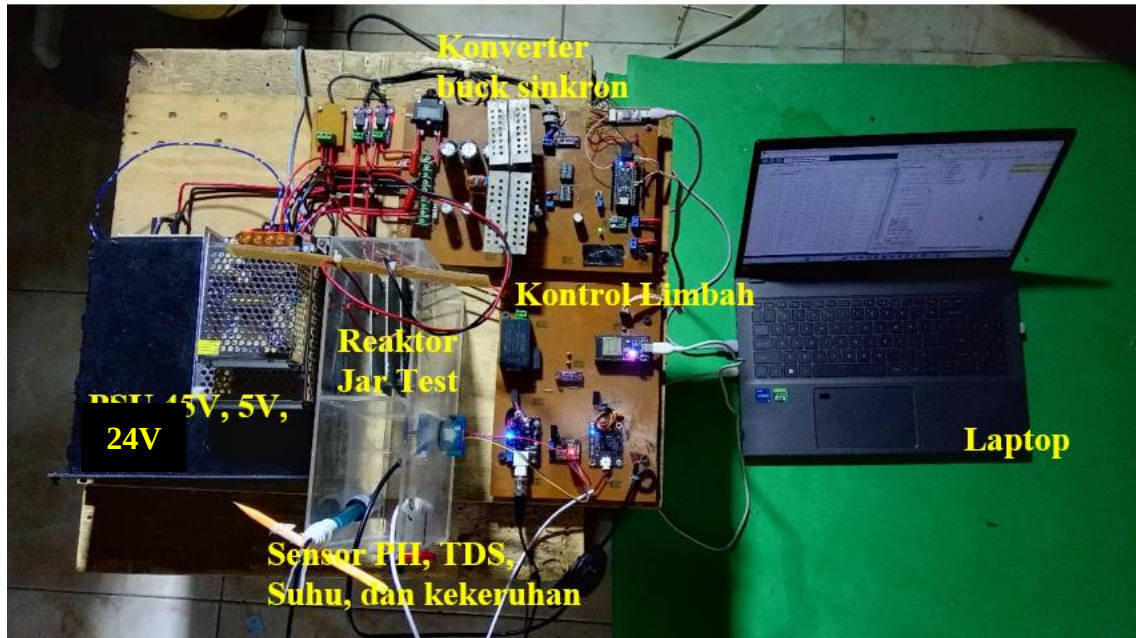
Gambar 9. flowchart diagram kontrol Sensor limbah

Gambar 9. Menunjukkan flowchart diagram kontrol sensor limbah menggambarkan proses pemantauan kualitas air yang dimulai dengan inisialisasi perangkat dan sensor, diikuti pembacaan data dari sensor PH, TDS, kekeruhan, dan suhu. Data diproses dengan koreksi dan filter, kemudian data sensor dimasukkan ke logika fuzzy yang terdiri dari fuzifikasi, infrensi dan defuzifikasi sehingga dapat menentukan kualitas air[16]. Hasilnya dikirim ke UART2 dan monitor serial, dan sistem berulang sampai ada perintah untuk mematikan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Perangkat Keras

System elektrokoagulasi menggunakan konverter buck sinkron dengan kontrol PI untuk pengolahan limbah domestik, dalam penggunaan alat ini pengujian pengolahan limbah domestic diterapkan dalam pengujian jar test dengan volume limbah 1,5 Liter. Tampilan alat secara keseluruhan Terdiri dari : 1. Modul Synchronus buck converter dengan Batasan arus 20A, 2. Power suplay tiga bagian yaitu power suplay Eltek SMPS 1000 dengan tegangan 45 volt power suplay 24 volt 5 Ampere dan power suplay 5 volt 3A yang dihubungkan dengan tegangan 220 volt, 3. Tempat uji jartest 4. Modul sensor control kualitas limbah yang digunakan untuk memberi feedback kondisi limbah yang menghasilkan nilai kualitas limbah kemudian di konver menjadi nilai tegangan yang nantinya akan digunakan untuk setpoint modul konverter buck sinkron dan Modul control limbah di hubungkan ke Laptop melalui port USB, yang digunakan untuk memantau nilai dari modul control sensor dan modul konverter buck sinkron.



Gambar 10. Realisasi alat.

B. Hasil Tuning Kontrol Konverter buck sinkron

Melakukan tuning pada nilai K_p sehingga sistem menjadi osilasi seperti Gambar 7. Dimana didapatkan nilai K_p sama dengan nilai critical gain (K_{cr}) yaitu 0.03, untuk critical period (P_{cr}) didapat dari periode frekuensi osilasi yaitu 0.9351Hz kemudian didapatkan periode 1.07 S. Jika sudah di dapat nilai K_{cr} dan nilai P_{cr} maka akan dilakukan Perhitungan menggunakan persamaan kontrol PI pada Tabel 1.

$$K_p = 0,45 \times K_{cr} = 0,45 \times 0,04 = 0,01125$$

$$T_i = \frac{1}{1,2} \times P_{cr} = \frac{1}{1,2} \times 1,07 = 0,9$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{0,01125}{0,9} = 0,0125$$

Hasil fine tuning didapatkan nilai yang paling optimal yaitu $K_p = 0.12$, $K_i = 0.40$.



Gambar 11. Pengukuran Osilasi konverter buck sinkron.

C. Pengujian Modul Konverter Buck Sinkron

Pada pengujian ini akan dilakukan pengujian kontrol PI synchronus buck converter apakah dapat mengatur tegangan output sesuai setpoint yang kita inginkan, kemudian dilakukan pengujian efisiensi hasil analisa pengujian dapat dilihat pad Tabel 3.

Tabel 3. Tabel pengujian Konverter buck sinkron

Set point	Tegangan (V)		Arus (I)		Beban resistor	Power (Watt)		Power Efficiency (η)
	Input	Output	Input	Output		Input	Output	
12	44.92	12.05	0.207	0.371	33ohm	9.3	4.47	48.06 %
24	43.92	24.06	0.582	0.78	33ohm	25.56	18.77	73.43 %
35	44.40	34.98	1.059	1.172	33 ohm	47.01	40.99	87.19 %
12	44.93	12.06	0.254	0.571	22 ohm	11.41	6.89	60.38 %
24	44.31	24.05	0.77	1.174	22 ohm	34.12	28.23	82.74 %
35	44.87	35.03	1.543	1.747	22 ohm	69.23	61.2	88.40 %
12	44.93	12.04	0.431	1.241	10 ohm	19.36	14.94	77.16 %
24	44.85	24.04	1.546	2.668	10 ohm	69.34	64.14	92.50 %
35	44.77	35.02	3.226	3.877	10 ohm	144.42	135.77	94.01 %

D. Pengambilan limbah

Pengambilan sampel limbah dilakukan di Perumahan X, daerah Candi, Sidoarjo. Sebanyak 10 sampel diambil dari titik pembuangan selokan perumahan yang mengalir ke sungai.



Gambar 12. Tempat Pengambilan Limbah



Gambar 13. Sampel limbah sebelum di proses.

E. Pengujian Sensor PH, Sensor TDS, Sensor SUHU , Kekeruhan

Untuk mengetahui bahwa sensor PH, sensor TDS, sensor suhu dan sensor kekeruhan ini apakah dapat digunakan dapat ditentukan dengan menghitung nilai error dan presentase error serta melakukan kalibrasi dalam menentukan nilai error dapat menggunakan persamaan 5 [17].

$$Error = \left| \frac{x - x_1}{1} \right| \quad (5)$$

Untuk menghitung persentase error digunakan persamaan 6[17].

$$Error = \left| \frac{x - x_1}{1} \right| \times 100\% \quad (6)$$

Pengujian sensor ph dilakukan dengan cara membandingkan pengukuran larutan kalibrasi PH dengan alat ukur PH EZ 9909 dan sensor PH. Dari perbandingan didalam Tabel 4. tersebut didapat rata rata error pembacaan untuk alat ukur 0.25 % dan untuk sensor 2.3 %

Tabel 4. Tabel pengujian sensor PH

Nilai air kalibrasi PH	Hasil Baca Alat Ukur	Error	%Error	Hasil baca sensor PH	Error	%Error
4	4.01	0.0025	0.25%	4.09	0.0225	2,25%
6.86	6.84	0.0029	0.29%	6.85	0.001	0.14%
9.18	9,20	0.0021	0.21%	9,15	0.0032	0.32%
Rata Rata Error		0.0075	0.25%		0.023	2.3%

Pengujian sensor TDS dan Suhu dilakukan dengan mengkalibrasi dan membandingkan pembacaan dengan alat ukur. Dimana dari hasil pengujian sensor tds hanya memiliki kemampuan membaca dengan baik hingga 700 ppm memiliki eror pembacaan rata rata 0.35% dan untuk rata rata eror sensor suhu yaitu 1,53% , hasil analisa pengujian sensor TDS dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Pengujian Sensor TDS dan Suhu

No	Larutan Kalibrasi	Alat Tds Meter	Sensor tds meter	Error%	Alat Pengukur Suhu	Sensor Suhu	Error%
1	60 ppm	61	61	0.0%	29,8	30.2	1,3%
2	500 ppm	502	506	0.79%	29,6	30.2	2%
3	718 ppm	721	719	0,27%	29.8	30.2	1,3%
Rata rata eror				0.35%			1,53%

Pengujian sensor kekeruhan menggunakan larutan formazin 0 NTU dan 100 NTU kemudian didapatkan tegangan output sensor dan dihitung menggunakan regresi linear 2 titik sehingga menghasilkan nilai NTU, pada sensor kekeruhan memiliki batasan pengukuran 0 NTU – 100 NTU, hasil analisa pengambilan data tegangan hasil baca sensor kekeruhan terhadap larutan formazin dapat dilihat pada tabel 6.

Tabel 6. Tabel pengambilan data tegangan sensor turbidity

No	Larutan Formazin	Tegangan Sensor
1	0 NTU	3.796V
2	100 NTU	3.438 V

Dari tegangan yang didapat digunakan regresi linear untuk menghitung nilai NTU nya menggunakan persamaan 7 dan Persamaan 8[18].

$$x_1 = 0, y_1 = 3.796$$

$$x_2 = 100, y_1 = 3.438$$

$$a = \frac{\sum y(\sum x^2) - \sum y(\sum xy)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (7)$$

$$a = \frac{7.234 \times 10000 - 100 \times 343.8}{2 \times 10000 - 100^2} = \frac{72340 - 34380}{20000 - 10000} = 3.796$$

$$b = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (8)$$

$$b = \frac{2 \times 343.4 - 100 \times 7.234}{2 \times 10000 - 100^2} = \frac{687.6 - 723.5}{20000 - 10000} = -0.00358$$

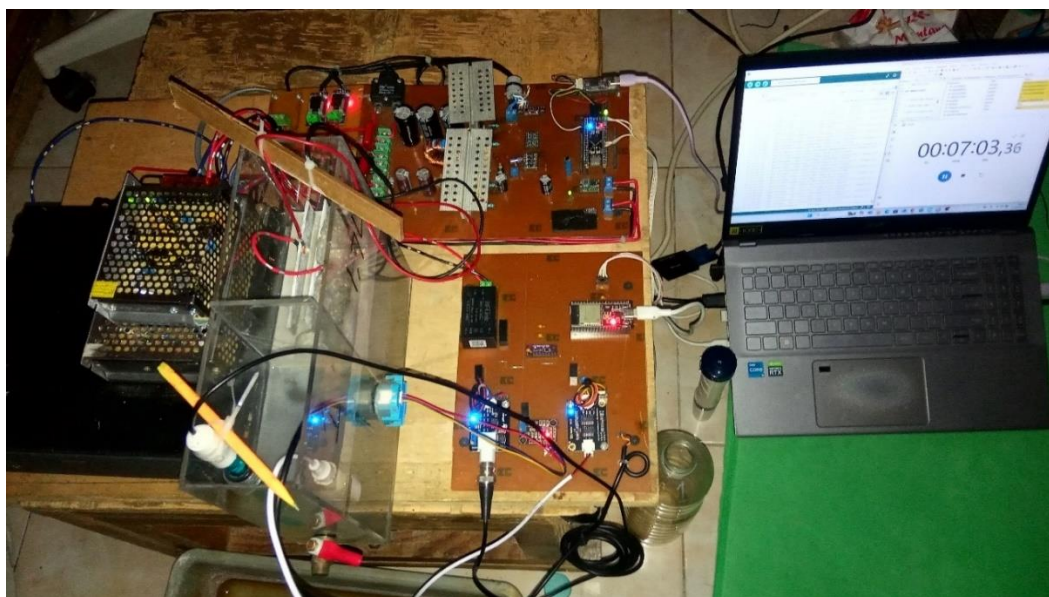
Dengan nilai a = 3.796 dan b = 0.00465, persamaan regresi linear yang diperoleh adalah:

$$y = 3,796 - 0.00358x$$

F. Pengujian Keseluruhan System

Pengujian keseluruhan sistem dilakukan dengan mengevaluasi modul kontrol limbah melalui analisis hasil pembacaan sensor pH, suhu, TDS, dan kekeruhan untuk menentukan nilai kualitas limbah. Pada modul konverter buck

sinkron, pengujian dilaksanakan selama 25 menit dengan pengambilan sampel arus input-output serta tegangan input-output setiap 5 menit. Data yang diperoleh kemudian dirata-ratakan untuk menghitung efisiensi konverter. Seluruh proses pengujian menggunakan limbah cair sebanyak 1,5 liter sebagai media uji.



Gambar 14. Pengujian Keseluruhan System

Pada proses Percobaan pertama dilakukan pengambilan data sensor modul kontrol limbah dan pembacaan alat ukur sebelum dilakukan proses uji jartest dengan elektrokoagulasi menggunakan konverter buck sinkron dengan kontrol PI pada limbah yang akan di uji. Selain analisa pembacaan sensor kemudian dilakukan pencatatan kualitas limbah sebelum diolah dan output tegangan yang akan digunakan sebagai setpoint modul konverter buck sinkron untuk mengolah limbah hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 7.

Tabel 7. Hasil pembacaan sensor, alat ukur, kualitas limbah dan tegangan output setpoint sebelum proses elektrokoagulasi dilakukan

NO	Pembacaan Sensor				Pembacaan Alat ukur			Kualitas Limbah	Tegangan output (Setpoint)
	PH	TDS	Suhu	Kekeruhan	PH	TDS	Suhu		
1	7,29	679	29,1	100 NTU	6,95	815	30,1	85	16V
2	7,44	712	30,8	100 NTU	7,16	793	29,5	85	16V
3	7,56	717	30,8	100 NTU	7,12	782	30,4	85	16V
4	7,65	718	30,6	100 NTU	7,21	782	29,3	85	16V
5	7,61	713	30,6	100 NTU	7,16	783	29,3	85	16V
6	7,04	700	30,7	100 NTU	7,08	794	29,7	85	16V
7	7,27	700	30,4	100 NTU	7,20	782	29,6	85	16V
8	7,44	708	30,3	100 NTU	7,25	813	28,7	85	16V
9	7,38	703	29,8	100 NTU	7,40	806	28,9	85	16V
10	7,58	702	29,7	100 NTU	7,55	803	28,4	85	16V

Pada proses Percobaan kedua dilakukan pengambilan data sensor modul kontrol limbah dan pembacaan alat ukur sesudah dilakukan proses uji jartest dengan elektrokoagulasi menggunakan konverter buck sinkron dengan kontrol PI pada limbah yang akan di uji. Selain analisa pembacaan sensor kemudian dilakukan pencatatan kualitas limbah sesudah diolah dan output tegangan yang akan digunakan sebagai setpoint modul konverter buck sinkron untuk mengolah limbah dan hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 8.

Tabel 8. Hasil pembacaan sensor, alat ukur, kualitas limbah dan tegangan output setpoint setelah proses elektrokoagulasi dilakukan.

NO	Sensor				Pembacaan Alat ukur			Kualitas Limbah	Tegangan output (Setpoint)
	PH	TDS	Suhu	kekeruhan	PH	TDS	Suhu		
1	8,17	686	37,9	68 NTU	7,91	641	36,7	85	16 V
2	8,06	693	38,3	44 NTU	7,52	676	35,2	85	16 V
3	7,83	694	37,2	51 NTU	7,37	671	32,3	85	16 V
4	7,89	693	37,4	57 NTU	7,30	648	36,0	85	16 V
5	7,90	692	36,7	49 NTU	7,38	678	33,7	85	16 V
6	7,79	684	37,1	45 NTU	7,42	681	37,1	85	16 V
7	7,57	678	37	56 NTU	7,40	670	34,3	85	16 V
8	7,68	691	35,1	48 NTU	7,77	705	33,2	85	16 V
9	7,47	688	35,1	44 NTU	7,65	682	33,5	85	16 V
10	7,93	687	34,9	44 NTU	7,81	684	33	85	16 V

Pada pengujian ketiga proses pengambil data dilakukan ketika seluruh sistem di jalankan. Pada proses pengujian ini akan dilakukan pengukuran arus Input dan arus output konverter buck sinkron, pengambilan data arus dilakukan setiap interval 5 menit untuk mencatat perubahan arus input dan output, hasil pengujian ini dapat dilihat pada tabel 9. Setelah didapatkan data arus input maka dilakukan perhitungan arus rata rata.

Tabel 9. Tabel Arus input dan output converter buck sinkron setiap 5 menit.

No	Arus Input					Rata - rata arus input	Arus Output					Rata - rata arus output
	5 menit	10 menit	15 menit	20 menit	25 menit		5 menit	10 menit	15 menit	20 menit	25 menit	
1	0,83	0,81	0,79	0,77	0,75	0,7991	2,15	2,1	2,03	1,97	1,92	2,0391
2	0,88	0,88	0,86	0,84	0,84	0,86	2,2	2,2	2,11	2,07	2,07	2,1391
3	0,82	0,79	0,77	0,75	0,78	0,7891	2,02	1,94	1,88	1,81	1,84	1,991
4	0,827	0,82	0,81	0,76	0,79	0,80191	2,03	2	1,98	1,84	1,92	1,9591
5	0,77	0,76	0,73	0,72	0,75	0,7591	1,9	1,9	1,75	1,75	1,83	1,8391
6	0,82	0,83	0,81	0,8	0,81	0,8191	2,04	2,06	2,01	1,96	2,00	2,0191
7	0,81	0,8	0,76	0,75	0,75	0,7791	2,01	1,97	1,88	1,84	1,83	1,9191
8	0,8	0,79	0,77	0,76	0,74	0,7791	2,01	1,98	1,92	1,90	1,85	1,9391
9	0,83	0,81	0,78	0,77	0,73	0,7891	2,06	2,02	1,93	1,89	1,79	1,9491
10	0,79	0,77	0,76	0,74	0,72	0,7691	2	1,94	1,91	1,82	1,79	1,89591

Pada pengujian ke empat dilakukan pengambilan data tegangan setiap 5 menit pada setiap limbah guna untuk menghitung rata rata tegangan input dan tegangan output selama proses pengujian hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 10.

Tabel 10. hasil ukur tegangan input dan output converter buck sinkron setiap 5 menit.

No	Tegangan Input					Rata - rata tegangan input	Tegangan Output					Rata - rata tegangan output
	5 menit	10 menit	15 menit	20 menit	25 menit		5 menit	10 menit	15 menit	20 menit	25 menit	
1	44,91	44,91	44,91	44,91	44,91	44,91	16	15,99	16	16	16	16
2	44,9	44,9	44,89	44,89	44,89	44,89	16	15,99	16	16	16	16
3	44,89	44,9	44,89	44,89	44,89	44,89	16	16	16	15,99	16	16
4	44,88	44,88	44,88	44,88	44,88	44,88	16	16	16	16	16	16
5	44,88	44,88	44,88	44,87	44,87	44,88	16	16	16	16	16	16
6	44,87	44,87	44,87	44,87	44,86	44,87	16	16	16	16	16	16
7	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	16	16	15,99	15,98	16	15,99
8	44,84	44,84	44,84	44,84	44,48	44,77	16	15,99	16	15,99	16	16
9	44,83	44,83	44,83	44,83	44,84	44,83	16	16	16	16	16	16
10	44,84	44,84	44,84	44,84	44,84	44,84	15,99	16	15,99	15,99	16	15,99

Pada pengujian lima, Setelah didapatkan data rata rata arus dan tegangan maka dilakukanlah perhitungan rata rata Daya dan perhitungan efisiensi synchronus buck converter saat sistem berjalan dan hasil nya dapat dilihat pada tabel 11.

Tabel 11 . Tabel pengujian Konverter buck sinkron saat seluruh sistem dijalankan

NO percobaan	Set point	Tegangan (V)		Rata – Rata Arus (I)		Rata -Rata Power (Watt)		Power Efficiency (η)	Waktu proses
		Input	Output	Input	Output	Input	Output		
1	16	44,91	16	0,7991	2,0391	35,88	32,62	90,9	25 menit
2	16	44,89	16	0,86	2,1391	38,6	34,22	88,65	25 menit
3	16	44,89	16	0,7891	1,991	35,42	31,85	89,93	25 menit
4	16	44,88	16	0,80191	1,9591	35,98	31,34	87,09	25 menit
5	16	44,88	16	0,7591	1,8391	34,06	29,42	86,37	25 menit
6	16	44,87	16	0,8191	2,0191	36,75	32,3	87,89	25 menit
7	16	44,86	15,99	0,7791	1,9191	34,95	30,68	87,79	25 menit
8	16	44,77	16	0,7791	1,9391	34,88	31,02	88,94	25 menit
9	16	44,83	16	0,7891	1,9491	35,37	31,18	88,15	25 menit

10	16	44,84	15,99	0,7691	1,89591	34,48	30,31	87,9	25 menit
----	----	-------	-------	--------	---------	-------	-------	------	-------------

Setelah dilakukan pengujian dari limbah sampel 1 – 10 Gambar 15. adalah gambar hasil pengujian limbah domestik.



Gambar 15. Sampel limbah sesudah diproses

VII. SIMPULAN

Kesimpulan Penelitian ini berhasil membuktikan bahwa sistem elektrokoagulasi berbasis konverter buck sinkron dengan kontrol PI mampu bekerja secara efisien untuk pengolahan limbah domestik. Konverter buck sinkron menunjukkan performa yang mengesankan dengan mencapai efisiensi hingga 94% pada beban tinggi, meskipun efisiensinya menurun signifikan pada beban rendah. Kontrol PI terbukti efektif dalam mengatur tegangan output secara stabil pada rentang 12-40V, walaupun memerlukan proses tuning manual menggunakan metode Ziegler-Nichols.

Dalam hal monitoring kualitas limbah, sistem sensor yang terdiri dari pH, TDS, dan kekeruhan menunjukkan hasil yang cukup akurat. Sensor pH memiliki error rata-rata 2,3%, sementara sensor TDS memiliki keterbatasan akurasi di atas 700 ppm. Sistem kontrol berbasis fuzzy logic berhasil mengklasifikasikan kualitas limbah dan mengkonversinya menjadi sinyal kontrol tegangan, meskipun memiliki keterbatasan dalam hal akurasi pembacaan parameter tertentu.

Analisis terhadap efektivitas pengolahan menunjukkan hasil yang beragam. Sistem ini berhasil menstabilkan pH dalam kisaran 7,47-8,17 yang memenuhi baku mutu, serta mengurangi kekeruhan sebesar 32-56% dari 100 NTU menjadi 44-68 NTU. Untuk parameter TDS, terjadi penurunan sebesar 15,3% dari 795,3 ppm menjadi 673,6 ppm yang sudah memenuhi standar baku mutu limbah domestik. Namun, terdapat kenaikan suhu sebesar 5-7,5°C akibat proses elektrolisis yang perlu menjadi pertimbangan.

Secara keseluruhan, sistem ini telah memenuhi tujuan utama penelitian dalam menciptakan solusi pengolahan limbah domestik yang efisien. Meskipun demikian, masih terdapat ruang untuk pengembangan lebih lanjut, terutama dalam meningkatkan akurasi sensor, mengoptimasi kontrol, serta mengintegrasikan metode pengolahan tambahan untuk parameter yang belum sepenuhnya memenuhi standar. Temuan penelitian ini memberikan dasar yang kuat untuk pengembangan sistem pengolahan limbah yang lebih komprehensif di masa depan.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada kedua orang tua saya yang selalu mendoakan dan mendampingi saya dalam setiap proses penelitian ini. Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada dosen pembimbing yang dengan sabar membimbing hingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan hasil yang baik. Tidak lupa, saya berterima kasih kepada rekan-rekan yang telah banyak membantu selama proses penelitian. Tanpa dukungan dari semua pihak, penelitian ini tidak akan berjalan dengan lancar.

REFERENSI

- [1] B. Bhadana *et al.*, *Electro-Coagulation and Electro-Oxidation in Water and Wastewater Treatment*. American Society of Civil Engineers, 2016. doi: <https://doi.org/10.1061/9780784416020>.
- [2] E. Wiyanto, B. Harsono, A. Makmur, R. Pangputra, J. Julita, and M. S. Kurniawan, "PENERAPAN ELEKTROKOAGULASI DALAM PROSES PENJERNIHAN LIMBAH CAIR," *Jetri : Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 12, no. 1, pp. 19–36, Feb. 2014, doi: 10.25105/JETRI.V12I1.1449.
- [3] I. Pratiwi and A. Setiorini, "PENURUNAN NILAI pH, COD, TDS, TSS PADA AIR SUNGAI MENGGUNAKAN LIMBAH KULIT JAGUNG MELALUI ADSORBEN."
- [4] A. Baihaqi, E. Kurniawan, and wahmisari Prihartini, "Penyetelan Arus dan Tegangan Elektrolisis Dengan Pemantauan Daya Untuk Menghasilkan Air Konsumsi Rumah Tangga," Bandung, Oct. 2022. [Online]. Available: https://www.academia.edu/28297051/Analisa_Efisie
- [5] H. Zomorodi and E. Nazari, "Design and Simulation of Synchronous Buck Converter in Comparison with Regular Buck Converter," *International Journal of Robotics and Control Systems*, vol. 2, no. 1, pp. 79–86, 2022, doi: 10.31763/ijrcs.v2i1.538.
- [6] R. W. Rachmad and T. Abuzairi, "Simulasi Efisiensi Buck Converter Asynchronous dan Synchronous Berdasarkan Variasi Nilai Duty Cycle dan Beban," *SENTER*, vol. 7, no. <https://senter.ee.uinsgd.ac.id/repositori/index.php/prosiding/issue/view/senter2022>, pp. 9–19, Apr. 2022.
- [7] H. SUCU, T. GÖKTAŞ, and M. ARKAN, "Design, Simulation and Application of Buck Converter with Digital PI Controller," *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 9, no. 2, pp. 106–113, Apr. 2021, doi: 10.17694/bajece.884290.
- [8] I. P. Setiady, M. Hannats, H. Ichsan, and H. Fitriyah, "Purwarupa Sistem Monitoring dan Otomatisasi Air Limbah Industri Tekstil dengan Metode Fuzzy Logic Mamdani," *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 6, no. 6, pp. 2591–2601, Jul. 2022, Accessed: Apr. 08, 2025. [Online]. Available: <https://j-ptiik.ub.ac.id/index.php/j-ptiik/article/view/11123>
- [9] N. Ihda, F. Nisa, and A. Aminudin, "Pengaruh Penambahan Dosis Koagulan Terhadap Parameter Kualitas Air dengan Metode Jarrest," *JRST (Jurnal Riset Sains dan Teknologi)*, vol. 3, no. 2, pp. 61–67, Sep. 2019, doi: 10.30595/JRST.V3I2.4500.
- [10] M. I. Budi, D. Hadidjaja, R. Saputra, I. Anshory, and S. D. Ayuni, "Design of Automatic Cooker Hood Using NodeMCU," *JEEE-U (Journal of Electrical and Electronic Engineering-UMSIDA)*, vol. 8, no. 1, pp. 1–14, Apr. 2024, doi: 10.21070/jeeeu.v8i1.1680.
- [11] M. P. M. Combatt, W. C. S. Amorim, E. M. da S. Brito, A. F. Cupertino, R. C. S. Mendonça, and H. A. Pereira, "Design of parallel plate electrocoagulation reactors supplied by photovoltaic system applied to water treatment," *Comput Electron Agric*, vol. 177, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.compag.2020.105676.
- [12] ON Semiconductor, "LC Selection Guide for the DC-DC Synchronous Buck Converter," Apr. 2013, Accessed: Nov. 20, 2023. [Online]. Available: www.onsemi.com
- [13] U. Widya Kartika and J. I. Sutorejo Prima Utara, "Perbandingan Metode Tuning PID pada Pengaturan Kecepatan Parallel Hybrid Electric Vehicle," *Telekontran : Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali dan Elektronika Terapan*, vol. 10, no. 1, pp. 9–17, Aug. 2022, doi: 10.34010/TELEKONTRAN.V10I1.7411.
- [14] B. I. (Bagus) Setiawan, "Perancangan Robot Auto Line Follower Yang Menerapkan Metode Osilasi Ziegler-Nichols Untuk Tuning Parameter PID Pada Kontes Robot Indonesia," *Jurnal Mahasiswa Teknik Elektro Universitas Brawijaya*, vol. 1, no. 1, p.

- 114737, 2013, Accessed: Oct. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.neliti.com/publications/114737/>
- [15] P. Studi, T. Elektro, F. Sains, and D. Teknologi, "Hot Water Looping System to Control Temperature of Drug Production Based Arduino," *Procedia of Engineering and Life Science*, vol. 2, no. 2, Jun. 2022, doi: 10.21070/PELS.V2I2.1258.
- [16] F. I. Negara, S. Syahririni, A. H. Falah, and I. Sulistiyowati, "Sistem Pengendali Berat Sampah Organik Pada Mesin Pencacah Sampah Organik Berbasis Fuzzy," *Journal of Electrical Engineering and Computer (JEECOM)*, vol. 5, no. 2, pp. 258–267, Oct. 2023, doi: 10.33650/jeeecom.v4i2.
- [17] F. . Baskoro, R. A. Ivory, N. . Kholis, F. . Baskoro, and . . Nurhayati, "REVIEW PENGGUNAAN SENSOR SUHU TERHADAP RESPON PEMBACAAN SKALA PADA INKUBATOR BAYI: REVIEW PENGGUNAAN SENSOR SUHU TERHADAP RESPON PEMBACAAN SKALA PADA INKUBATOR BAYI," *JURNAL TEKNIK ELEKTRO*, vol. 10, no. 1, pp. 185–194, 2021, doi: 10.26740/JTE.V10N1.P185-194.
- [18] Z. Muttaqin and E. Srihartini, "PENERAPAN METODE REGRESI LINIER SEDERHANA UNTUK PREDIKSI PERSEDIAAN OBAT JENIS TABLET," *Sistem Informasi* |, vol. 9, no. 1, pp. 12–16.

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.