

# Rancang Bangun Sistem Digital Twin Menara Pendingin Dengan Monitoring Kualitas Air dan Analisis Efisiensi Energi Berbasis PLC-HMI

Rio Pratama <sup>a,1,\*</sup>, Luki Utomo <sup>b,2</sup>

<sup>a,b</sup>Universitas Pamulang, Jl. Witana Harja No.18b, Pamulang Bar., Kec. Pamulang, Kota Tangerang Selatan, Banten  
15417 Indonesia.

<sup>1</sup> rio.pratama.eng@gmail.com \*; <sup>2</sup> dosen00904@unpam.ac.id;

\* Korespondensi penulis

Submission: 15/11/2025, Revision: 19/11/2025, Accepted: 09/12/2025

## ABSTRAK

*This study aims to design and develop an automatic water quality monitoring system based on a Programmable Logic Controller (PLC) and Human Machine Interface (HMI), capable of monitoring three key parameters: temperature, pH, and Total Dissolved Solids (TDS). The system is controlled by a Mitsubishi FX3U-24MR PLC, utilizing a PT100 temperature sensor converted via a 4–20 mA signal, an analog pH sensor calibrated using a three-point method, and a TDS sensor based on ADC processing with signal amplification through an LM358 module. All sensor data are converted and displayed in real-time through a Haiwell D4 Series 4.3-inch HMI, which also supports cloud connectivity for remote monitoring. The system is equipped with an automatic alarm that activates when parameter values exceed predetermined thresholds, along with a hysteresis function to prevent false alarm fluctuations. Testing results show that the system is capable of reading parameters with accuracy close to standard measuring instruments, providing rapid notifications of abnormal conditions, and significantly reducing the need for manual intervention. In terms of cost efficiency, the system can reduce operational expenses by up to 50% compared to manual methods, with an estimated return on investment (ROI) within just two months. Based on these findings, the system is proven to be effective in enhancing energy efficiency, improving operational reliability, and is suitable for widespread implementation in industrial cooling systems that require continuous and precise water quality monitoring.*

*Key words: Cooling Tower, Water Quality Monitoring, PLC, HMI, Energy Efficiency.*

## ABSTRACT

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sistem pemantauan kualitas air otomatis berbasis Programmable Logic Controller (PLC) dan Human Machine Interface (HMI) yang dapat memantau tiga parameter utama, yaitu suhu, pH, dan Total Dissolved Solids (TDS). Sistem ini dikendalikan oleh PLC Mitsubishi FX3U-24MR, dengan sensor suhu PT100 yang dikonversi melalui sinyal 4–20 mA, sensor pH analog yang dikalibrasi pada tiga titik, serta sensor TDS berbasis ADC. Semua data sensor dikonversi dan ditampilkan secara real-time melalui HMI Haiwell D4 Series 4.3 inci yang mendukung konektivitas cloud untuk pemantauan jarak jauh. Sistem ini dilengkapi dengan alarm otomatis yang aktif saat nilai parameter melebihi ambang batas yang telah ditentukan, serta histeresis untuk menghindari fluktuasi alarm palsu. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem ini mampu membaca parameter dengan akurasi mendekati alat ukur standar, memberikan notifikasi cepat terhadap kondisi abnormal, serta secara signifikan mengurangi kebutuhan intervensi manual. Dari segi efisiensi biaya, sistem ini juga mampu mengurangi pengeluaran operasional hingga 50% dibandingkan metode manual, dengan estimasi waktu pengembalian investasi (Return of Investment/ROI) hanya dalam dua bulan. Berdasarkan hasil tersebut, sistem ini terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi energi, keandalan operasional, dan dapat diterapkan secara luas pada sistem pendingin industri yang memerlukan pemantauan kualitas air secara kontinu dan presisi.

Kata Kunci: Menara Pendingin, Pemantauan Kualitas Air, PLC, HMI, Efisiensi Energi.

*This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.*



## PENDAHULUAN

### Latar Belakang

Menara pendingin memainkan peran vital dalam sistem pendinginan industri dan komersial dengan fungsi utama membuang panas dari proses atau sistem HVAC, memastikan operasional pada suhu optimal. Fungsi ini menuntut sistem yang adaptif untuk mempertahankan efisiensi energi dan penggunaan air yang optimal di bawah variasi beban panas.

Kualitas air merupakan faktor penentu, sebab air berkualitas rendah dapat memicu korosi, kerak, dan *biofilm*, yang secara signifikan menurunkan efisiensi termal menara pendingin dan berdampak langsung pada peningkatan konsumsi energi [1]. Oleh karena itu, pemantauan kualitas air (pH, suhu, TDS) secara kontinu sangat esensial untuk mengoptimalkan kinerja sistem dan mengurangi biaya operasional.

Seiring kemajuan teknologi, sistem pemantauan kini diimplementasikan menggunakan Programmable Logic Controller (PLC) dan Human Machine Interface (HMI). Teknologi ini memfasilitasi pengumpulan data *real-time* dan pengendalian sistem otomatis, yang meningkatkan responsivitas terhadap perubahan kondisi air [2], serta dapat diintegrasikan dengan Internet of Things (IoT) untuk pemantauan jarak jauh. Meskipun terdapat tantangan pada biaya instalasi awal yang tinggi [3], manfaat jangka panjangnya dalam meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi biaya operasional yang memberikan investasi yang signifikan.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem pemantauan kualitas air berbasis PLC dan HMI guna mengoptimalkan efisiensi energi pada menara pendingin. Hasil studi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pada pengembangan teknologi pemantauan kualitas air dalam konteks industri berkelanjutan.

### Menara Pendingin (*Cooling Tower*)

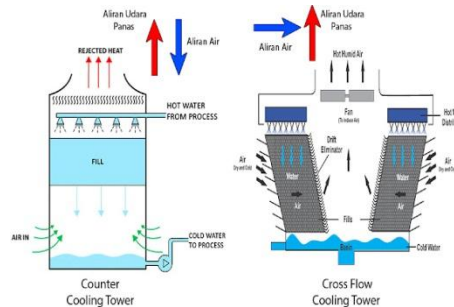
Menara pendingin adalah komponen penting dalam sistem pendinginan yang digunakan untuk menghilangkan panas dari proses industri atau sistem HVAC. Fungsi utama dari menara pendingin adalah untuk menurunkan suhu air yang digunakan dalam proses pendinginan dengan memanfaatkan evaporasi. Dalam konteks industri, menara pendingin sering kali digunakan untuk mendinginkan air yang akan digunakan kembali dalam sistem, sehingga dapat menghemat penggunaan air dan energi. Menara pendingin berfungsi sebagai alat yang efisien dalam menjaga suhu operasional mesin dan peralatan industri. Proses pendinginan ini sangat penting, terutama dalam industri yang membutuhkan suhu tertentu untuk menjaga kualitas produk dan kelangsungan proses produksi. Dalam banyak kasus, suhu yang tinggi dapat menyebabkan kerusakan pada mesin dan mengurangi efisiensi operasional. Oleh karena itu, perlu adanya sebuah sistem yang mampu melakukan pengamatan kualitas air secara terus menerus [4].

Dalam konteks efisiensi energi, menara pendingin memainkan peran penting dalam penghematan biaya operasional. Dengan menggunakan air yang didinginkan kembali, perusahaan dapat mengurangi penggunaan sumber daya air dan energi. [5] menjelaskan tentang perencanaan pemanfaatan air *blowdown* dari *cooling tower* untuk *supply makeup water*, yang menunjukkan bahwa dengan pengelolaan yang tepat, air yang terbuang dapat dimanfaatkan kembali dalam proses pendinginan. Namun, penting untuk diingat bahwa pengoperasian menara pendingin juga memiliki tantangan tersendiri. Salah satu tantangan utama adalah pengendalian pertumbuhan mikroorganisme, seperti legionella, yang dapat berkembang dalam kondisi air yang hangat. Hal ini dapat menimbulkan risiko kesehatan bagi pekerja dan masyarakat sekitar. Oleh karena itu, pengendalian kualitas air dan penggunaan biocides yang tepat menjadi sangat penting untuk menjaga keamanan dan kesehatan. Melihat dari sisi lingkungan, penggunaan menara pendingin yang efisien juga dapat mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Dengan mengurangi penggunaan air dan energi, emisi gas rumah kaca juga dapat diminimalkan. Penelitian yang dilakukan oleh [1], menunjukkan bahwa kualitas air pendingin memiliki dampak langsung terhadap performa menara pendingin, yang pada gilirannya berpengaruh pada efisiensi energi dan emisi yang dihasilkan.

### Prinsip Kerja Menara Pendingin

Menara pendingin merupakan salah satu komponen penting dalam sistem pendinginan industri, terutama pada fasilitas yang menggunakan proses pendinginan untuk menjaga suhu operasional mesin dan peralatan. Cara kerja sistem menara pendingin berfokus pada penghilangan panas dari air yang digunakan dalam proses pendinginan. Proses ini melibatkan beberapa tahapan yang saling berkaitan, mulai dari pengambilan air, proses pendinginan, hingga pengembalian air ke sistem. Panas dari air dibawa oleh udara yang dihisap oleh *fan* ke bagian atas *cooling tower* sedangkan air yang telah didinginkan akan turun ke bagian bawah *cooling tower* dan akan dialirkan kembali ke dalam kondensor menggunakan *cooling water pumps* [6]. Pada umumnya, air panas dari sistem proses akan dialirkan ke menara pendingin. Di dalam menara, air tersebut akan menyebar melalui **media pengisi (*fill*) yang dirancang untuk meningkatkan area permukaan air**. Dengan cara ini, air akan bertemu

dengan udara yang mengalir dari bawah ke atas, sehingga terjadi proses pertukaran panas. Menurut [7], efisiensi pertukaran panas ini sangat dipengaruhi oleh kecepatan aliran udara dan suhu air yang masuk. Semakin tinggi suhu air, semakin besar potensi kehilangan panas yang terjadi. Prinsip kerja menara pendingin dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Prinsip Kerja Menara Pendingin

### Sistem Kontrol Otomatis

Sistem kontrol otomatis merupakan salah satu komponen kunci dalam industri modern yang berfungsi untuk mengatur dan mengendalikan proses atau peralatan tanpa memerlukan intervensi langsung dari operator. Dalam era digital saat ini, penerapan teknologi ini semakin meluas, terutama dalam konteks industri yang membutuhkan efisiensi, akurasi, keamanan, dan penghematan energi yang tinggi. Berbagai sistem kontrol otomatis dirancang dengan tujuan untuk meningkatkan produktivitas dan mengurangi kemungkinan kesalahan manusia dalam pengoperasian mesin. Di antara berbagai teknologi yang ada, PLC dan HMI menjadi dua elemen penting yang saling melengkapi dalam menciptakan sistem kontrol yang efektif.

### METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian ini menggunakan pendekatan rekayasa rancang bangun (*engineering design*) yang bertujuan menghasilkan sistem pemantauan kualitas air otomatis berbasis PLC dan HMI. Proses penelitian dimulai dengan analisis kebutuhan untuk menentukan parameter kualitas air yang relevan, seperti pH, suhu, dan TDS, sebagai indikator utama standar penggunaan industri. Selanjutnya dilakukan tahap perancangan sistem, implementasi perangkat kendali, hingga pengujian prototipe untuk memastikan akurasi data real-time. Dengan pendekatan ini, sistem diharapkan mampu mendukung efisiensi operasional menara pendingin sekaligus menjawab tuntutan regulasi lingkungan dan keberlanjutan sumber daya air [8].

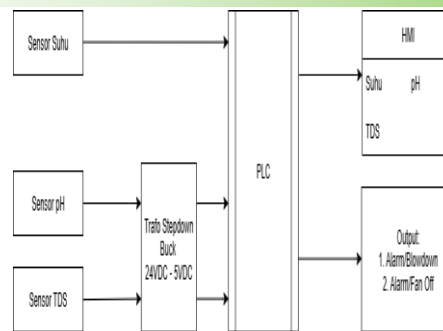
Pengujian dan validasi merupakan tahap krusial dalam pengembangan sistem pemantauan kualitas air berbasis PLC dan HMI pada menara pendingin. Proses dimulai dengan simulasi untuk memverifikasi algoritma kontrol dalam mengelola data sensor terhadap parameter pH, suhu, dan tingkat kontaminasi. Selanjutnya dilakukan uji lapangan dengan mengintegrasikan sistem ke perangkat keras menara pendingin untuk memastikan kinerja dalam kondisi nyata. Data real-time yang diperoleh dibandingkan dengan standar kualitas air yang ditetapkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, serta divalidasi melalui uji laboratorium. Validasi ini penting untuk menjamin akurasi data sekaligus meningkatkan kepercayaan terhadap sistem.

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui observasi langsung, pengukuran menggunakan sensor otomatis, dan pencatatan parameter utama seperti pH, suhu, turbidity, dan TDS. Data yang terkumpul kemudian dianalisis secara statistik menggunakan regresi dan korelasi untuk menilai pengaruh kualitas air terhadap efisiensi energi menara pendingin. Analisis ini tidak hanya menunjukkan efektivitas sistem, tetapi juga menghasilkan rekomendasi perbaikan yang relevan. Dengan demikian, sistem pemantauan kualitas air berbasis PLC dan HMI terbukti dapat menjadi alat pengambilan keputusan yang mendukung efisiensi operasional sekaligus keberlanjutan lingkungan industri.

### Blok Diagram Sistem

Blok diagram sistem menggambarkan hubungan antar komponen utama dalam sistem dapat dilihat pada Gambar 2. Berikut komponen-komponen yang terlibat:

1. Sensor, terdiri dari sensor pH, sensor suhu dan sensor TDS.
2. *Buck converter* (24VDC to 5VDC).
3. PLC.
4. HMI.
5. *Power Supply* 24VDC.



Gambar 2. Diagram Blok Sistem

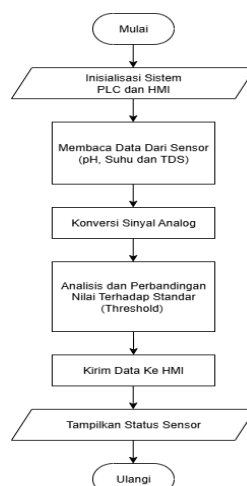
Langkah-langkah kerja pada diagram blok sistem di atas dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Sensor (pH, suhu dan TDS), mengukur kualitas air.
2. *Buck converter* (*trafo stepdown*) digunakan untuk menurunkan tegangan dari 24VDC menjadi 5VDC, karena beberapa sensor yang digunakan dalam sistem ini hanya dapat beroperasi pada tegangan 5VDC. Output dari *stepdown converter* ini kemudian digunakan sebagai sumber daya untuk sensor-sensor yang tidak kompatibel dengan tegangan 24VDC.
3. PLC, menerima input, memproses logika kontrol.
4. HMI, menampilkan data dan mengatur kontrol sistem.
5. *Power Supply* 24VDC. Memberikan tegangan untuk seluruh sistem (sensor suhu, *Buck converter*, PLC dan HMI).
6. *Output*, alarm atau perintah untuk membuka katup untuk proses *blowdown* dan mematikan satu fan jika suhu terlalu rendah.

### Diagram Alir Program

Diagram alir (*flowchart*) program menggambarkan urutan logis proses yang dilakukan oleh sistem mulai dari inisialisasi hingga pemantauan kualitas air secara terus menerus. PLC bertugas membaca data sensor secara berkala, memproses data sesuai batas ambang yang ditentukan, dan mengirimkan hasilnya ke HMI untuk ditampilkan. Diagram alir dapat dilihat pada Gambar 3, berikut penjelasan tentang diagram alir:

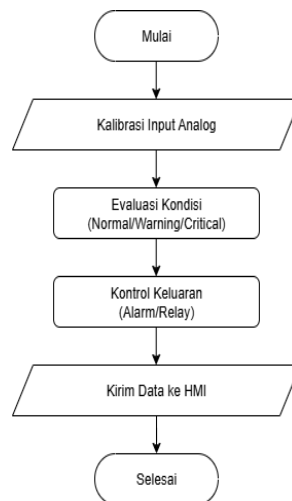
1. Mulai sistem
2. Inisialisasi PLC dan HMI
3. Membaca data dari sensor:
  - a. Sensor pH
  - b. Sensor suhu PT100
  - c. Sensor TDS
4. Analisis dan perbandingan nilai terhadap standar (*threshold*)
5. Kirim data ke HMI
6. Tampilkan status air dan alarm jika ada penyimpangan
7. Ulangi proses pemantauan



Gambar 3. Diagram Alir Program Kontrol

### Pemrograman PLC

Pemrograman dilakukan menggunakan GX Works2 atau GX Developer dengan metode *ladder diagram*. Diagram Alir pemrograman PLC dapat dilihat pada Gambar 4.

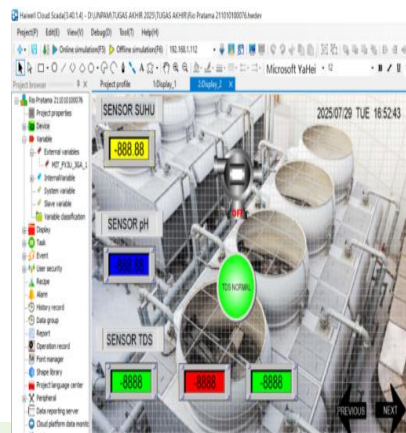


Gambar 4. Diagram Alir Pemrograman PLC

Salah satu pendekatan dalam pemrograman PLC adalah menggunakan bahasa pemrograman *ladder diagram* (LD), yang merupakan bahasa yang paling umum digunakan dalam industri. *Ladder diagram* memungkinkan insinyur untuk merancang logika kontrol dengan cara yang mirip dengan skema rangkaian listrik. Dalam konteks sistem pemantauan kualitas air, setiap sensor dapat diwakili oleh simbol tertentu dalam ladder diagram, dan logika kontrol dapat ditentukan berdasarkan kondisi yang diukur oleh sensor tersebut. Misalnya, jika sensor pH mendeteksi bahwa nilai pH air berada di luar batas yang telah ditentukan, PLC dapat diprogram untuk mengaktifkan pompa dosing yang akan menyeimbangkan pH air tersebut. Sebuah studi oleh [2] menunjukkan bahwa sistem kendali level air berbasis PLC dapat meningkatkan keandalan dan efisiensi dalam pengelolaan sumber daya air.

### Desain Tampilan HMI

Tampilan antarmuka Desain HMI yang dapat dilihat pada Gambar 5 sangat krusial dalam keberhasilan sistem pemantauan kualitas air. HMI yang efektif harus menyajikan data dengan jelas dan mudah dipahami, dengan elemen desain seperti tata letak, warna, dan ikon yang dipilih secara cermat untuk akses informasi yang cepat. Penelitian oleh [9] menunjukkan bahwa HMI digunakan untuk menampilkan data kualitas air secara visual, termasuk indikator warna seperti lampu merah dan hijau untuk mempercepat pemahaman kondisi air. Penggunaan grafik dan visualisasi data seperti grafik garis untuk pH atau turbidity memudahkan pengguna memahami tren kualitas air secara real-time. Hal ini sejalan dengan penelitian [10] yang menyatakan bahwa monitoring real-time pada grafik sangat memudahkan masyarakat untuk mengetahui kondisi kualitas air terkini. Selain itu, indikator status seperti alarm atau notifikasi juga memungkinkan penilaian cepat terhadap kondisi sistem.



Gambar 5. Tampilan HMI

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pengujian langsung dilaksanakan di gedung XYZ, guna memastikan bahwa alat berfungsi dengan baik dan menghasilkan nilai parameter yang tepat serta akurat. Pengambilan sampel juga dilakukan untuk disimulasikan secara langsung pada maket menara pendingin yang telah dibuat. Pengujian sensor pH dilakukan dengan menggunakan kualitas air yang berbeda, mulai dari pH rendah, sedang hingga tinggi untuk memastikan sensor bekerja secara akurat dan akan dibandingkan dengan alat ukur yang sudah dikalibrasi. Hasil dari pengujian dapat dilihat pada Tabel 1.

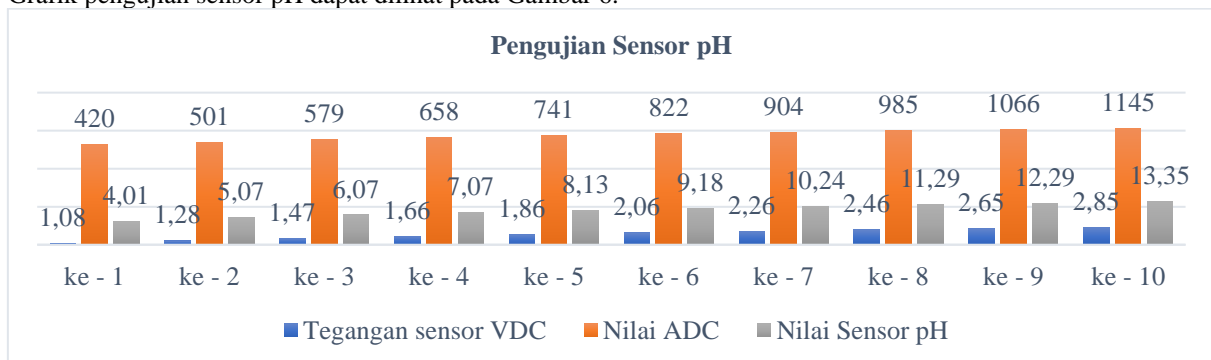
Tabel 1. Hasil Pengujian Sensor pH (8pt, ditengah)

No	Pengujian	Tegangan Sensor (VDC)	Nilai (ADC)	Nilai Sensor (pH)	Alat Ukur (pH)
1	ke - 1	1,08	420	4,01	4,02
2	ke - 2	1,28	501	5,07	5,06
3	ke - 3	1,47	579	6,07	6,06
4	ke - 4	1,66	658	7,07	7,07
5	ke - 5	1,86	741	8,13	8,14
6	ke - 6	2,06	822	9,18	9,18
7	ke - 7	2,26	904	10,24	10,23
8	ke - 8	2,46	985	11,29	11,27
9	ke - 9	2,65	1066	12,29	12,31
10	ke - 10	2,85	1145	13,35	13,32

Pengujian sensor pH dilaksanakan sebanyak sepuluh kali dengan tujuan untuk mengidentifikasi hubungan antara tegangan keluaran sensor, nilai ADC yang terukur oleh sistem, serta nilai pH yang dihasilkan. Data hasil pengujian disajikan dalam Tabel 1 yang mencakup tiga parameter utama, yaitu tegangan sensor (VDC), nilai ADC, dan nilai pH. Berdasarkan hasil pengujian, bahwa setiap peningkatan tegangan sensor diikuti oleh peningkatan nilai ADC serta nilai pH yang terukur. Kenaikan persentase antar pengujian dihitung dengan menggunakan rumus:  $\Delta\% = (\text{nilai sekarang} - \text{nilai sebelumnya}) / \text{nilai sebelumnya} \times 100\%$ .

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa pada pengujian pertama hingga kedua, terjadi peningkatan tegangan sebesar 18,52%, nilai ADC sebesar 19,29%, dan nilai pH sebesar 26,43%. Persentase kenaikan ini cenderung menurun secara bertahap pada pengujian berikutnya, dengan rata-rata peningkatan tegangan sebesar 0,1967 V per langkah, peningkatan ADC rata-rata sebesar 80,56 satuan per langkah, dan kenaikan pH rata-rata sebesar 1,0378 satuan pH per langkah. Secara kumulatif, tegangan meningkat sebesar 163,89% (dari 1,08 V menjadi 2,85 V), nilai ADC meningkat sebesar 172,62% (dari 420 menjadi 1145), dan nilai pH meningkat sebesar 232,92% (dari 4,01 menjadi 13,35) dari pengujian pertama hingga kesepuluh. Analisis regresi linear menunjukkan adanya hubungan yang sangat kuat antara tegangan sensor dengan nilai pH, dengan persamaan  $pH = 5,2744 \times V - 1,6837$  dan koefisien determinasi  $R^2 = 1,0000$ . Hubungan antara nilai ADC dan pH juga menunjukkan linearitas yang sangat baik dengan persamaan  $pH = 0,0128 \times ADC - 1,3789$  dan koefisien determinasi yang serupa. Hal ini mengindikasikan bahwa sensor beroperasi secara konsisten dalam rentang pengujian dan dapat digunakan untuk pengukuran pH yang akurat setelah dilakukan kalibrasi berdasarkan persamaan yang diperoleh.

Berdasarkan hasil ini, dapat disimpulkan bahwa sensor pH yang diuji memiliki performa yang stabil dan linier terhadap perubahan pH larutan dalam rentang pengukuran 4,01 hingga 13,35. Persamaan kalibrasi yang dihasilkan dapat diimplementasikan pada sistem PLC dan HMI untuk menampilkan nilai pH secara langsung dari pembacaan ADC. Selain itu, hasil pengujian ini juga dapat dijadikan acuan untuk pemeliharaan dan pengecekan berkala guna memastikan akurasi serta kestabilan pembacaan sensor dalam aplikasi di lapangan. Grafik pengujian sensor pH dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Pengujian Sensor pH

Pengujian sensor suhu juga dilakukan dengan menggunakan kualitas air yang berbeda, mulai dari suhu rendah, sedang hingga tinggi untuk memastikan sensor bekerja secara akurat dan akan dibandingkan dengan alat ukur yang sudah dikalibrasi.

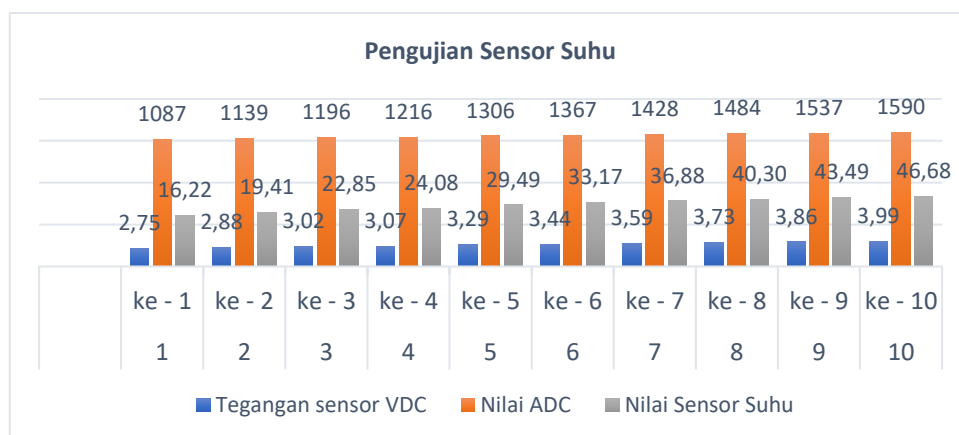
Tabel 2. Hasil Pengujian Sensor Suhu

No	Pengujian	Tegangan Sensor (VDC)	Nilai (ADC)	Nilai Sensor Suhu (°C)	Alat Ukur Suhu (°C)
1	ke - 1	2,75	1087	16,22	16,25
2	ke - 2	2,88	1139	19,41	19,40
3	ke - 3	3,02	1196	22,85	22,85
4	ke - 4	3,07	1216	24,08	24,06
5	ke - 5	3,29	1306	29,49	29,50
6	ke - 6	3,44	1367	33,17	33,19
7	ke - 7	3,59	1428	36,88	36,80
8	ke - 8	3,73	1484	40,30	40,27
9	ke - 9	3,86	1537	43,49	43,48
10	ke - 10	3,99	1590	46,68	46,69

Pengujian sensor suhu dilakukan sebanyak sepuluh kali untuk mengevaluasi hubungan antara tegangan keluaran sensor, nilai ADC yang dibaca oleh sistem akuisisi, dan nilai suhu yang terukur. Data pengujian disajikan dalam Tabel 2, yang menunjukkan bahwa tegangan sensor meningkat dari 2,75 V menjadi 3,99 V, nilai ADC bertambah dari 1087 menjadi 1590, dan nilai suhu meningkat dari 16,22 °C menjadi 46,68 °C. Kenaikan relatif antar-pengujian dihitung menggunakan persentase perubahan:  $\Delta\% = (\text{nilai sekarang} - \text{nilai sebelumnya}) / \text{nilai sebelumnya} \times 100\%$ . Pada pengujian berurutan, terlihat bahwa persentase kenaikan tegangan berkisar antara 1,66% hingga 7,17% per langkah, kenaikan ADC berkisar antara 1,67% hingga 7,40% per langkah, dan kenaikan suhu berkisar antara 5,38% hingga 22,47% per langkah; secara kumulatif, suhu meningkat sekitar 187,79% dari pengujian pertama hingga pengujian kesepuluh.

Analisis regresi linear menghasilkan persamaan kalibrasi. Suhu =  $24,5720 \times V - 51,3541$  untuk hubungan Tegangan  $\rightarrow$  Suhu dan Suhu =  $0,0605288 \times \text{ADC} - 49,5489$  untuk hubungan ADC  $\rightarrow$  Suhu, dengan koefisien determinasi  $R^2$  yang mendekati 1 pada kedua kasus. Hal ini menunjukkan bahwa keluaran sensor bersifat linier terhadap perubahan suhu dalam rentang pengujian, sehingga persamaan kalibrasi tersebut dapat diimplementasikan pada PLC/HMI untuk konversi otomatis nilai ADC menjadi nilai suhu.

Berdasarkan hasil ini, dapat disimpulkan bahwa sensor pH yang diuji memiliki performa yang stabil dan linier terhadap perubahan pH larutan dalam rentang pengukuran 4,01 hingga 13,35. Persamaan kalibrasi yang dihasilkan dapat diimplementasikan pada sistem PLC dan HMI untuk menampilkan nilai pH secara langsung dari pembacaan ADC. Selain itu, hasil pengujian ini juga dapat dijadikan acuan untuk pemeliharaan dan pengecekan berkala guna memastikan akurasi serta kestabilan pembacaan sensor dalam aplikasi di lapangan. Grafik Hasil pengujian sensor suhu dapat dilihat pada Gambar 7.



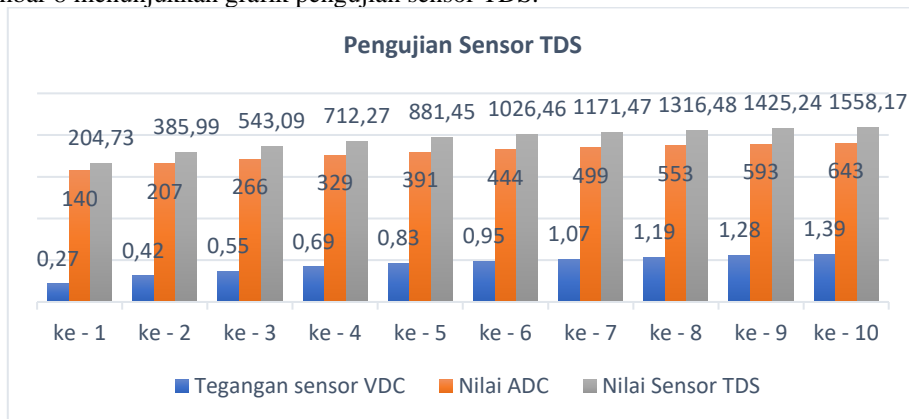
Gambar 7. Grafik Pengujian Sensor Suhu

Pengujian sensor TDS juga dilakukan dengan menggunakan kualitas air yang berbeda, mulai dari TDS rendah, sedang hingga tinggi untuk memastikan sensor bekerja secara akurat dan akan dibandingkan dengan alat ukur yang sudah dikalibrasi [11].

Tabel 3. Pengujian Sensor TDS

No	Pengujian	Tegangan Sensor (VDC)	Nilai (ADC)	Nilai Sensor (TDS)	Alat Ukur (TDS)
1	ke - 1	0,27	140	204,73	204,56
2	ke - 2	0,42	207	385,99	385,01
3	ke - 3	0,55	266	543,09	543,91
4	ke - 4	0,69	329	712,27	713,58
5	ke - 5	0,83	391	881,45	880,56
6	ke - 6	0,95	444	1026,46	1023,30
7	ke - 7	1,07	499	1171,47	1171,42
8	ke - 8	1,19	553	1316,48	1316,86
9	ke - 9	1,28	593	1425,24	1424,58
10	ke - 10	1,39	643	1558,17	1559,24

Berdasarkan hasil pengujian sensor TDS yang disajikan pada Tabel 3 di atas, terlihat adanya hubungan linier positif antara tegangan sensor (VDC), nilai ADC, dan nilai TDS yang terukur. Tegangan sensor meningkat secara bertahap dari 0,27 V pada pengujian pertama menjadi 1,39 V pada pengujian kesepuluh. Kenaikan tegangan ini diikuti dengan peningkatan nilai ADC dari 140 menjadi 643, serta kenaikan nilai TDS dari 204,73 ppm menjadi 1.558,17 ppm. Persentase kenaikan nilai TDS antar pengujian menunjukkan tren menurun, dimulai dari 88,54% pada pengujian kedua, kemudian 40,70% pada pengujian ketiga, 31,15% pada pengujian keempat, dan menurun hingga mencapai 9,33% pada pengujian kesepuluh. Hal ini menunjukkan bahwa pada rentang awal pengukuran, perubahan tegangan sensor memberikan peningkatan TDS yang relatif besar, sedangkan pada rentang tegangan lebih tinggi, laju kenaikan TDS menjadi lebih kecil. Temuan ini menegaskan bahwa sensor TDS memiliki sensitivitas yang lebih tinggi pada tegangan rendah dibandingkan tegangan tinggi, meskipun secara keseluruhan tetap menunjukkan hubungan yang searah antara parameter yang diukur. Gambar 8 menunjukkan grafik pengujian sensor TDS.



Gambar 8. Grafik Pengujian Sensor TDS

Sistem pemantauan kualitas air berbasis PLC dan HMI yang dirancang dalam kajian ini tidak hanya bertujuan untuk memperoleh data kualitas air secara real-time, tetapi juga untuk meningkatkan efisiensi energi serta menekan biaya operasional yang timbul akibat pemantauan manual dan keterlambatan dalam penanganan masalah sistem menara pendingin.

Berdasarkan data yang tertera pada Tabel 4, dilakukan analisis komparatif terhadap konsumsi energi listrik (KWH) pada menara pendingin antara bulan Mei periode saat sistem digital twin dioperasikan dan bulan Juni, ketika sistem tersebut tidak aktif. Data ini mencakup dua kategori waktu pengukuran, yaitu Waktu Beban Puncak (WBP) dan Waktu Luar Beban Puncak (LWBP), yang masing-masing memiliki karakteristik pemakaian energi yang berbeda.

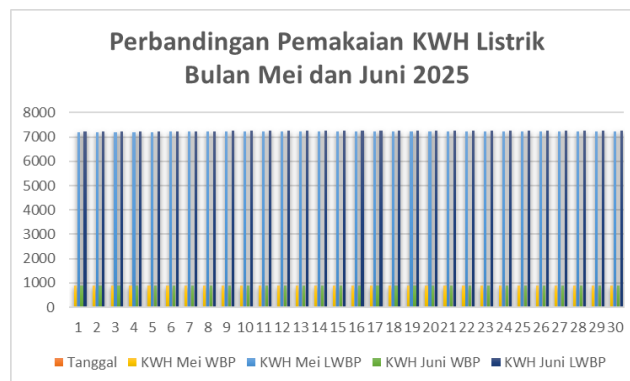
Tabel 4. Analisis Efisiensi Energi Bulan Mei dan Juni Tahun 2025

No	Tanggal	KWH			
		Bulan Mei		Bulan Juni	
		WBP	LWBP	WBP	LWBP
1	1	879,94	7206,92	881,4	7237,62
2	2	879,94	7207,67	881,54	7238,49
3	3	879,94	7208,45	881,54	7239,92
4	4	879,94	7208,45	881,54	7241,2
5	5	879,94	7209,28	881,54	7242,59

No	Tanggal	KWH			
		Bulan Mei		Bulan Juni	
		WBP	LWBP	WBP	LWBP
6	6	879,94	7210,83	881,54	7243,24
7	7	879,94	7212,32	881,54	7243,24
8	8	879,94	7213,71	881,54	7243,66
9	9	879,94	7215,58	881,8	7244,82
10	10	879,94	7216,37	881,93	7246,18
11	11	880,12	7216,95	881,93	7247,57
12	12	880,12	7217,38	881,93	7248,91
13	13	880,12	7218,11	881,97	7250,31
14	14	880,12	7219,76	882,25	7251,43
15	15	880,12	7221,05	882,25	7252,37
16	16	880,22	7222,37	882,25	7253,55
17	17	880,56	7223,98	882,25	7255,32
18	18	880,72	7224,58	882,25	7256,11
19	19	880,72	7225,4	882,25	7257,37
20	20	880,72	7226,42	882,25	7258,61
21	21	880,72	7226,42	882,25	7259,23
22	22	880,85	7229,08	882,58	7260,19
23	23	881,20	7230,69	882,69	7261,12
24	24	881,23	7231,51	882,69	7262,28
25	25	881,23	7231,87	882,69	7263,69
26	26	881,23	7232,92	882,69	7265,03
27	27	881,23	7234,07	882,69	7265,55
28	28	881,23	7235,43	882,69	7265,55
29	29	881,23	7236,12	882,69	7266,06
30	30	881,23	7236,12	882,77	7267,55
Total KWH		26.414,32	216.649,81	26.463,92	217.588,76
Selisih WBP				49,6	0,19%
Selisih LWBP				938,95	0,43%
Total Selisih KWH				988,55	0,62%

Pada bulan Mei, total konsumsi energi pada periode WBP tercatat sebesar 26.414,32 KWH. Sementara itu, pada bulan Juni, konsumsi pada periode WBP meningkat menjadi 26.463,92 KWH. Dengan demikian, terdapat selisih penghematan energi sebesar 49,60 KWH atau setara dengan 0,19% dari total pemakaian WBP. Meskipun nilai persentasenya tergolong kecil, penghematan ini mencerminkan adanya pengendalian beban puncak yang lebih baik ketika sistem digital twin diterapkan, yang pada skala industri dapat berkontribusi dalam mengurangi biaya operasional saat tarif listrik berada pada puncaknya [12].

Untuk periode LWBP, yang umumnya memiliki tarif listrik lebih rendah namun durasi operasional yang lebih panjang, konsumsi energi pada bulan Mei mencapai 216.649,81 KWH, sedangkan pada bulan Juni meningkat menjadi 217.588,76 KWH. Selisih yang dihasilkan adalah sebesar 938,95 KWH atau setara dengan 0,43% penghematan [13]. Persentase penghematan ini lebih tinggi dibandingkan dengan WBP, yang mengindikasikan bahwa sistem digital twin memiliki efektivitas yang lebih besar dalam mengoptimalkan operasi di luar beban puncak, kemungkinan melalui penyesuaian beban motor, pompa, dan peralatan pendingin agar beroperasi pada titik efisiensi optimal. Grafik perbandingan pemakaian KWH listrik dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik Perbandingan Pemakaian KWH Listrik

Berdasarkan hasil analisis, penerapan sistem *digital twin* pada menara pendingin terbukti mampu memberikan penghematan energi total sebesar 988,55 KWH atau 0,62% dibandingkan kondisi tanpa sistem.

Secara finansial, penghematan ini setara dengan keuntungan biaya operasional sebesar Rp 1.048.908,82 dalam satu bulan [14]. Penghematan terbesar diperoleh pada periode LWBP, yaitu sebesar 938,95 KWH (Rp 971.882,79), sementara pada periode WBP kontribusi penghematan sebesar 49,60 KWH (Rp 77.026,03). Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun persentase penghematan relatif kecil, implementasi sistem *digital twin* tetap signifikan dalam menekan biaya energi, terutama dalam jangka panjang dan pada beban LWBP yang memiliki durasi operasional lebih panjang. Berikut dijelaskan secara rinci pada Tabel 5.

Tabel 5. Selisih Pemakaian KWH dan Perhitungan Biaya

Periode	Selisih Energi (KWH)	Tarif per KWH (Rp)	Penghematan Biaya (Rp)	Persentase Efisiensi
WBP	49,6	1.553,67	77.026,03	0,19%
LWBP	938,95	1.035,78	971.882,79	0,43%
Total	988,55	-	1.048.908,82	0,62%

Dengan demikian, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa sistem digital twin mampu memberikan kontribusi positif terhadap efisiensi energi, terutama pada beban LWBP yang memberikan kontribusi terbesar terhadap total penghematan. Efisiensi ini tidak hanya mengurangi biaya operasional, tetapi juga mendukung upaya pengurangan emisi karbon melalui penurunan konsumsi energi, sehingga sejalan dengan prinsip keberlanjutan dalam manajemen energi industri.

Berdasarkan analisis efisiensi biaya operasional, terdapat dua skema pembiayaan yang dibandingkan, yaitu pembuatan alat sendiri dan sewa alat. Pada skema pembuatan alat, biaya investasi awal yang dikeluarkan sebesar Rp 9.000.000 dengan tambahan biaya kalibrasi Rp 500.000 setiap tiga bulan atau Rp 2.000.000 per tahun. Dengan demikian, total biaya pada tahun pertama mencapai Rp 11.000.000. Sementara itu, penghematan energi yang diperoleh dari penerapan sistem digital twin sebesar Rp 12.586.905,84 per tahun, sehingga menghasilkan keuntungan bersih sebesar Rp 1.586.905,84. Nilai ini memberikan Return on Investment (ROI) sebesar 14,43% pada tahun pertama. Pada tahun kedua dan seterusnya, biaya yang dikeluarkan hanya untuk kalibrasi sebesar Rp 2.000.000 per tahun, sehingga keuntungan bersih meningkat menjadi Rp 10.586.905,84 dengan ROI yang sangat tinggi, yaitu mencapai 529,35%. Hal ini menunjukkan bahwa investasi pada pembuatan alat akan semakin menguntungkan dalam jangka panjang karena biaya modal hanya dikeluarkan satu kali di awal [15].

Sebaliknya, pada skema sewa alat, biaya yang dikeluarkan mencapai Rp 6.000.000 per bulan atau setara Rp 72.000.000 per tahun. Dengan penghematan energi yang sama, yaitu Rp 12.586.905,84, maka skema sewa justru menimbulkan kerugian sebesar Rp 59.413.094,16 per tahun. Nilai ROI pada skema ini adalah negatif (-82,52%), yang menunjukkan bahwa metode sewa alat tidak layak untuk diterapkan karena biaya yang dikeluarkan jauh lebih besar dibandingkan keuntungan yang diperoleh. Tabel 6 menunjukkan efisiensi operasional pertahun.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa strategi pembuatan alat sendiri jauh lebih efektif dan efisien dibandingkan dengan skema sewa. Selain mampu memberikan ROI positif sejak tahun pertama, keuntungannya juga semakin besar pada tahun-tahun berikutnya, sehingga pembuatan alat menjadi pilihan yang paling tepat untuk mendukung efisiensi energi sekaligus menekan biaya operasional jangka panjang.

Tabel 6. Efisiensi Biaya Operasional Pertahun

Skema	Biaya Investasi Alat (Rp)	Biaya Tahunan (Rp)	Total Biaya Per-tahun (Rp)	Penghematan Energi (Rp)	Keuntungan Bersih (Rp)	ROI (%)
Tahun pertama	9.000.000,00	2.000.000,00	11.000.000,00	12.586.905,84	1.586.905,84	14,43%
Tahun kedua	0,00	2.000.000,00	2.000.000,00	12.586.905,84	10.586.905,84	529,35%
Sewa Alat	0,00	72.000.000,00	72.000.000,00	12.586.905,84	-59.413.094,16	-82,52%

Berdasarkan analisis, strategi pembuatan alat sendiri terbukti memberikan nilai efisiensi yang jauh lebih besar dibandingkan sewa alat. Selain mampu menekan biaya operasional, skema ini juga memberikan ROI positif yang meningkat signifikan pada tahun-tahun berikutnya. Hal ini sejalan dengan tujuan penelitian, yaitu tidak hanya memastikan sistem digital twin mampu menurunkan konsumsi energi pada menara pendingin, tetapi juga memberikan kontribusi nyata terhadap penghematan biaya operasional. Dengan demikian, penerapan sistem ini tidak hanya efektif dalam aspek teknis pemantauan kualitas air dan efisiensi energi, tetapi juga layak secara ekonomis dalam mendukung keberlanjutan operasional menara pendingin.

## Kesimpulan

Setelah melakukan pengujian pada Rancang Bangun Sistem Digital Twin Menara Pendingin dengan Monitoring Kualitas Air dan Analisis Efisiensi Energi Berbasis PLC-HMI Pada Tempat industri maupun gedung perkantoran, maka dapat disimpulkan beberapa hal yaitu :

1. Sistem digital twin menara pendingin memiliki biaya yang cukup murah dibandingkan dengan sewa alat, bahkan bisa memonitoring lebih dari satu parameter.
2. Sensor parameter air dan PLC memiliki tingkat akurasi yang baik dalam pengelolaan monitoring kualitas air.
3. Sensor TDS berperan penting dalam pengendalian kualitas air, disaat nilai TDS tinggi pompa bekerja otomatis untuk melakukan *blowdown* (Pengurangan air dari sistem) untuk mencegah kualitas air semakin memburuk yang mengakibatkan nilai operasional yang tinggi.
4. Efisiensi *man power* yang bisa dikurangi dikarenakan sudah tidak perlu pencatatan secara manual.
5. Dengan adanya sistem kontrol ini, efisiensi penggunaan air juga dapat dimonitor dan mempermudah jika terjadi perubahan yang secara tiba-tiba pada kualitas air, seperti perubahan yang diakibatkan pada cuaca.
6. Hasil pengujian keseluruhan sensor sangat akurat, baik dalam pengujian secara langsung maupun pada simulasi maket yang dibuat. Sehingga sangat direfrensikan untuk kebutuhan industri.
7. Intergrasi sensor pH, suhu dan TDS dengan PLC FX3U dan HMI dapat membantu dalam monitoing kualitas air serta menjaga kestabilan kadar kualitas air untuk menjaga efisiensi penggunaan air.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Yani and A. H. Y. Putra, "INoMeT: Jurnal Inovasi Rekayasa Mekanikal dan Termal Studi Performa Cooling Tower berdasarkan Kualitas Air Pendingin," *INoMeT: Jurnal Inovasi Rekayasa Mekanikal dan Termal*, vol. 01, no. 02, pp. 1–4, 2023, [Online]. Available: <https://doi.org/10.25077/xxxxx>
- [2] T. W. O. Putri, M. I. Mowaviq, and I. Hajar, "Rancang Bangun Sistem Kendali Level Air Berbasis Programmable Logic Controller dan Human Machine Interface," *KILAT*, vol. 10, no. 2, pp. 272–279, Oct. 2021, doi: 10.33322/kilat.v10i2.1315.
- [3] M. Amin, R. Harahap, R. Bangun, R. Harahap, and Z. Pelawi, "Rancang Bangun Sistem Kendali Dan Monitoring Pengolahan Air Limbah Berbasis PLC," 2023.
- [4] A. Firdhouzi, P. Hari Trisnawan, and D. Primanita Kartikasari, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Kualitas Air dengan menggunakan Arsitektur Jaringan Internet of Things," 2020. [Online]. Available: <http://j-ptiik.ub.ac.id>
- [5] B. Kurnianto *et al.*, "SISTEM MONITORING TOTAL DISSOLVED SOLID (TDS) PADA LOWER BASIN COOLING TOWER MENGGUNAKAN SENSOR BERBASIS INTERNET DI BANDAR UDARA INTERNASIONAL YOGYAKARTA-KULON PROGO," 2023.
- [6] S. A. Fatim, C. S. Abadi, D. Asep, and Y. Yussyama, "Kinerja Cooling Tower Pada PLTGU di Pabrik Semen X," 2023. [Online]. Available: <http://prosiding.pnj.ac.id>
- [7] N. Aini, D. Siswanto, and G. Priyandoko, "Monitoring Kualitas Air pada Cooling Tower untuk Mendukung Pengendalian Proses Blowdown berbasis Internet of Things (IoT)," *Seminar Nasional Fortei Regional*, vol. 7, 2021.
- [8] A. A. Firdaus, "Sistem Pemantauan Realtime Kualitas Air pada Menara Pendingin Berbasis Supervisory Control and Data Acquisition Di PT. Toyota Motor Manufacturing Indonesia," Universitas Sebelas Maret, 2024.
- [9] S. Rachman, M. Wahyu, Z. Ahyadi, and J. Teknik Elektro Politeknik Negeri Banjarmasin, "DESAIN SIMULASI VISUAL HMI (HUMAN MACHINE INTERFACE) ANTAR MUKA PLC GUNA MONITORING DATA PARAMETER AIR," 2022.
- [10] W. Kurniawan and M. Anwar, "Smart Water Quality Measurement System Berbasis IoT untuk Peningkatan Efektivitas Pemantauan Kualitas Sumber Air," *MASALIQ*, vol. 5, no. 5, pp. 2276–2292, Aug. 2025, doi: 10.58578/masaliq.v5i5.7048.
- [11] R. Rosaria, "PERANCANGAN SISTEM MONITORING KUALITAS AIR BERBASIS INTERNET OF THINGS (IOT) MENGGUNAKAN SENSOR PH DAN SENSOR TOTAL DISSOLVED SOLIDS (TDS)," *Simtek: j. sist. inf. dan Teknik komp'ut.*, vol. 11, no. 1, pp. 147–153, Apr. 2026.
- [12] R. A. Maringka, B. M. H. . Kilis, and J. D. . Ticoch, "KAJIAN EFISIENSI ENERGI LISTRIK DAN STRATEGI KONSERVASI DI PT BANK BRI CABANG TONDANO ", *KNOWLEDGE*, vol. 5, no. 2, pp. 280–288, Jun. 2025.
- [13] S. Hendri, I. Wayan Juliarta, and I. Machiyana, "Analisis Daya Listrik Terpasang Dalam Rangka Efisiensi Energi Listrik di Bandara Aek Godang ", *jptam*, vol. 10, no. 1, pp. 819–826, May 2026.

- [14] I Kadek Dwi Artha Guna, I Wayan Dikse Pancane, I Nyoman Gede Adrama, and I Wayan Sugarayasa, “Studi Audit Energi Listrik untuk Optimalisasi Konsumsi Daya pada Office Engineering Aston Denpasar Hotel & Convention Center”, Mars, vol. 4, no. 1, pp. 96–102, Jan. 2026.
- [15] Triono, B., Shaleh, M., & Anwar, M. S. (2025). PENINGKATAN KESADARAN PENGGUNAAN ENERGI LISTRIK PADA PERALATAN RUMAH TANGGA DI WARU SIDOARJO. Community Development Journal : Jurnal Pengabdian Masyarakat, 6(6), 6774–6780.