

Perancangan Sistem Automatic Transfer Switch Berbasis ESP32 Terintegrasi Scada Dan IoT Pada PLTS

Muhammad Hafizh Yusra^{1*}, Akhmad Wahyu Dani¹

¹Teknik Elektro, Universitas Mercu Buana, Jakarta

*Hafizhyusra02@gmail.com

Abstrak— Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang melimpah di Indonesia dan memiliki potensi besar sebagai alternatif pasokan listrik, khususnya melalui teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Untuk mengoptimalkan pemanfaatan PLTS sebagai sumber daya cadangan, penelitian ini merancang sistem Automatic Transfer Switch (ATS) berbasis mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) dan Internet of Things (IoT). Sistem ini memungkinkan perpindahan otomatis dari sumber utama (PLN) ke PLTS saat terjadi gangguan, serta mendukung pemantauan dan pengendalian jarak jauh secara real-time melalui platform SCADA InTouch dan aplikasi Blynk. Hasil implementasi menunjukkan sistem mampu mendeteksi gangguan dengan cepat, melakukan switching otomatis secara stabil, serta menampilkan seluruh parameter kelistrikan tanpa kendala melalui protokol komunikasi Modbus TCP/IP dan Blynk TCP/IP. Tegangan suplai terjaga stabil pada 4,97VDC, dan seluruh komponen—baik perangkat keras maupun perangkat lunak—berfungsi secara terintegrasi. Dengan keberhasilan pengujian pada seluruh aspek, sistem ini terbukti andal dan layak diterapkan sebagai solusi pengelolaan pasokan listrik hybrid berbasis energi terbarukan.

Kata Kunci— Pembangkit Listrik Tenaga Surya, Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA), Internet of Things (IOT), Energi Terbarukan

DOI: 10.22441/jte.2026.v17i1.006

I. PENDAHULUAN

Di era modern saat ini, kebutuhan akan sistem kelistrikan yang andal dan berkelanjutan menjadi semakin penting seiring dengan meningkatnya konsumsi energi listrik. Salah satu solusi yang terus dikembangkan adalah pemanfaatan sumber energi terbarukan, seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), yang berfungsi sebagai alternatif pengganti atau pendukung sumber daya utama. PLTS memanfaatkan energi matahari yang melimpah di Indonesia, sehingga berpotensi besar untuk membantu memenuhi kebutuhan energi nasional sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Namun, karena sifat PLTS yang intermiten dan bergantung pada kondisi cuaca, penggunaannya dalam sistem kelistrikan memerlukan dukungan dari sumber listrik utama seperti PLN, serta sebuah sistem pengendali switching otomatis yang mampu menjaga kontinuitas pasokan listrik saat terjadi gangguan [1].

Automatic Transfer Switch (ATS) merupakan komponen penting dalam sistem kelistrikan hybrid yang berfungsi untuk memindahkan beban secara otomatis antara dua sumber listrik. ATS memungkinkan transisi daya antara PLN sebagai sumber utama dan PLTS sebagai sumber cadangan, atau sebaliknya, tanpa intervensi manual. Dengan berkembangnya teknologi otomasi dan komunikasi data, perancangan ATS kini dapat dilakukan secara lebih cerdas dan efisien menggunakan mikrokontroler modern seperti ESP32. Mikrokontroler ini tidak hanya mengendalikan proses switching, tetapi juga mendukung koneksi Internet of Things (IoT) melalui jaringan WiFi, sehingga sistem dapat dipantau dan dikendalikan dari jarak jauh menggunakan perangkat mobile [2].

Integrasi teknologi IoT melalui platform Blynk memungkinkan pengguna untuk melakukan pemantauan dan pengendalian sistem ATS secara real-time melalui aplikasi mobile. Di sisi lain, sistem SCADA berbasis Wonderware InTouch memberikan antarmuka pemantauan dan kontrol lokal yang profesional, dengan visualisasi parameter kelistrikan dan status switching secara akurat dan real-time [3]. Penggabungan dua platform ini menjadikan sistem lebih fleksibel, dapat diakses dari berbagai tempat, serta cocok untuk kebutuhan skala laboratorium hingga semi-industri. Penggunaan sensor PZEM-004T juga memungkinkan sistem untuk mengukur parameter kelistrikan seperti tegangan, arus, dan daya secara presisi, sebagai dasar dalam pengambilan keputusan switching secara otomatis[4].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem ATS berbasis ESP32 yang terintegrasi dengan platform SCADA Wonderware InTouch dan Blynk IoT. Fokus penelitian meliputi perancangan sistem switching otomatis antar sumber PLN dan PLTS, integrasi komunikasi data menggunakan protokol TCP/IP (Modbus dan Blynk), serta penerapan sensor kelistrikan untuk mendukung keputusan switching. Penelitian ini juga membuktikan lingkupnya pada sistem dua sumber (PLN dan PLTS), penggunaan mikrokontroler ESP32, serta pengujian dalam skala laboratorium untuk memastikan bahwa sistem dapat diandalkan dan layak sebagai solusi manajemen daya listrik hybrid berbasis energi terbarukan.

II. METODOLOGI PENELITIAN

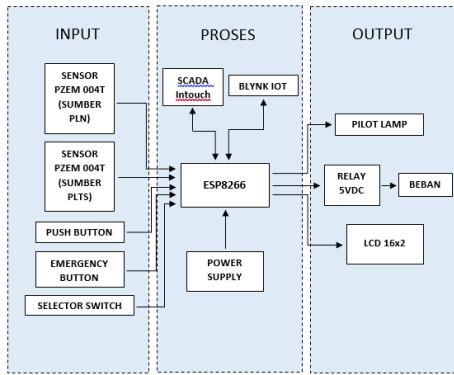
Penelitian ini mengadopsi pendekatan rekayasa sistem melalui proses perancangan dan implementasi alat berbasis mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan SCADA dan IoT pada PLTS. Hal ini disusun untuk memastikan perancangan

dan implementasi sistem Automatic Transfer Switch (ATS) berbasis ESP32 dapat dilakukan secara terstruktur dan sistematis. Tahapan yang dilakukan meliputi deskripsi alat, perancangan diagram blok sistem, penyusunan diagram alir proses kerja, penentuan spesifikasi komponen, input/output list, serta wiring diagram untuk mendukung implementasi perangkat keras dan perangkat lunak secara menyeluruhan.

A. Diagram Blok

Diagram blok pada sistem *Automatic Transfer Switch* (ATS) berbasis ESP32 disajikan untuk menggambarkan hubungan antar komponen utama dalam sistem kendali pemindahan sumber daya listrik antara PLN dan PLTS secara otomatis maupun manual. Gambar 1 menunjukkan representasi fungsional sistem secara keseluruhan.

Sistem terdiri atas dua sumber listrik, yakni PLN dan PLTS, yang masing-masing dipantau menggunakan sensor PZEM-004T untuk memperoleh data parameter kelistrikan seperti tegangan, arus, daya, dan frekuensi. Kedua sensor ini terhubung langsung ke mikrokontroler ESP32 melalui antarmuka serial. Selain itu, sistem menerima input kontrol dari perangkat fisik seperti push button, emergency button, dan selector switch yang berfungsi untuk memilih mode pengoperasian (manual/auto dan local/remote).



Gambar 1. Diagram Blok

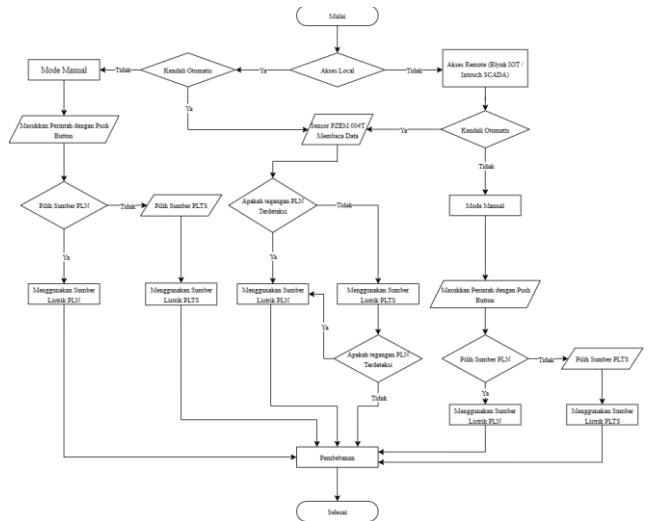
ESP32 berperan sebagai unit pusat pengendali (central control unit) yang memproses semua data input, baik dari sensor maupun dari input fisik, dan menentukan logika switching berdasarkan mode yang aktif. Dalam mode manual, switching dilakukan melalui perintah langsung dari push button, sedangkan dalam mode otomatis, switching dilakukan berdasarkan parameter tegangan dari sensor PZEM untuk menentukan ketersediaan sumber daya.

Output dari ESP32 mengaktifkan relay 5VDC yang mengatur koneksi ke beban listrik, baik dari sumber PLN maupun PLTS. Status switching ditunjukkan melalui pilot lamp, sementara parameter sistem ditampilkan pada LCD 16x2 yang terintegrasi di panel.

Untuk keperluan pemantauan dan kontrol jarak jauh, data dari ESP32 dikirimkan ke dua platform antarmuka: SCADA Wonderware InTouch melalui protokol Modbus TCP/IP menggunakan gateway KepServerX, serta aplikasi Blynk IoT melalui koneksi WiFi ke Blynk Cloud. Integrasi ini memungkinkan pengguna memantau status dan parameter sistem secara real-time serta mengendalikan switching dari lokasi manapun.

B. Diagram Alir

Diagram alir (flowchart) pada sistem *Automatic Transfer Switch* (ATS) berbasis ESP32 menggambarkan alur logika kerja sistem dalam menangani perpindahan sumber daya listrik secara otomatis maupun manual, baik dalam mode lokal maupun remote. Gambar 2 menyajikan logika utama sistem yang diimplementasikan ke dalam pemrograman mikrokontroler ESP32.



Gambar 2. Diagram Alir Sistem

Di Siklus kerja sistem dimulai saat ESP32 memperoleh tegangan dari catu daya 5VDC, yang menandai inisialisasi sistem. Pada tahap awal, sistem akan membaca status dari selector switch untuk menentukan mode operasi yang aktif, yaitu salah satu dari empat mode berikut:

- Local Manual
- Local Otomatis
- Remote Manua
- Remote Otomatis

Setelah mode ditentukan, ESP32 kemudian memproses input dari tombol fisik (pada mode lokal) atau dari aplikasi SCADA/Blynk (pada mode remote), tergantung pada konfigurasi selector switch. Setelah mode ditentukan, ESP32 kemudian memproses input dari tombol fisik (pada mode lokal) atau dari aplikasi SCADA/Blynk (pada mode remote), tergantung pada konfigurasi selector switch.

Pada mode manual, pengguna memiliki kontrol penuh atas pemilihan sumber daya (PLN atau PLTS) melalui push button atau perintah aplikasi, tanpa mempertimbangkan parameter kelistrikan. Sedangkan pada mode otomatis, sistem akan membaca nilai tegangan dari sensor PZEM-004T untuk masing-masing sumber. Jika tegangan PLN berada di bawah ambang batas, ESP32 akan memutus suplai dari PLN dan mengalihkan beban ke PLTS, atau sebaliknya jika PLN kembali normal.

Sinyal output dari ESP32 kemudian diberikan ke relay switching 5VDC untuk mengeksekusi peralihan sumber daya. Setelah switching dilakukan, indikator pilot lamp akan menyala untuk menunjukkan sumber yang sedang aktif. Parameter seperti tegangan, arus, daya, frekuensi, energi, dan faktor daya terus

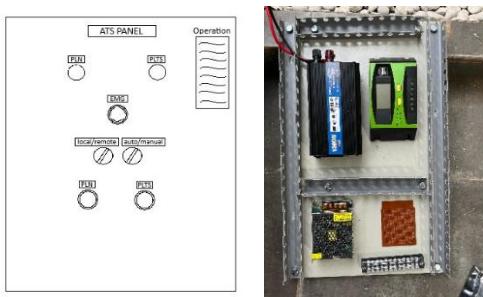
dipantau dan dikirimkan secara real-time ke SCADA dan Blynk untuk keperluan monitoring dan dokumentasi.

Sistem juga memiliki fitur keamanan berupa emergency button, yang jika ditekan akan langsung memutus seluruh relay switching dan menghentikan operasional sistem.

Dengan logika ini, sistem ATS mampu beradaptasi dengan kondisi listrik secara dinamis, memberikan fleksibilitas dalam pengoperasian baik secara lokal maupun jarak jauh, dan menjamin kontinuitas daya kepada beban dengan mekanisme switching yang cerdas dan otomatis.

C. Perancangan Mekanikal

Perancangan mekanikal pada sistem *Automatic Transfer Switch* (ATS) berbasis ESP32 difokuskan pada desain fisik panel kontrol agar memenuhi aspek ergonomis, kemudahan pengoperasian, serta efisiensi dalam pemasangan dan pemeliharaan. Panel dirancang dalam bentuk boks logam tertutup dengan tampilan antarmuka pengguna (HMI) yang terintegrasi pada permukaan pintu depan. Pada sisi luar panel, dipasang komponen kontrol dan indikator utama, yaitu:



Gambar 4. Desain Alat (kiri tampak depan, kanan tampak dalam)

Tata letak komponen pada pintu panel disusun secara vertikal untuk memudahkan operator dalam membaca dan mengoperasikan sistem. LCD dapat ditempatkan di sisi kanan atau bawah panel sesuai kebutuhan visual pengguna.

Bagian atas panel dirancang dengan lubang masuk untuk kabel tegangan AC 220V dari sumber PLN dan inverter PLTS, sedangkan bagian bawah panel disediakan lubang ventilasi untuk sirkulasi udara dan mencegah panas berlebih selama operasi berkelanjutan. Panel juga dilengkapi lubang output untuk kabel beban.

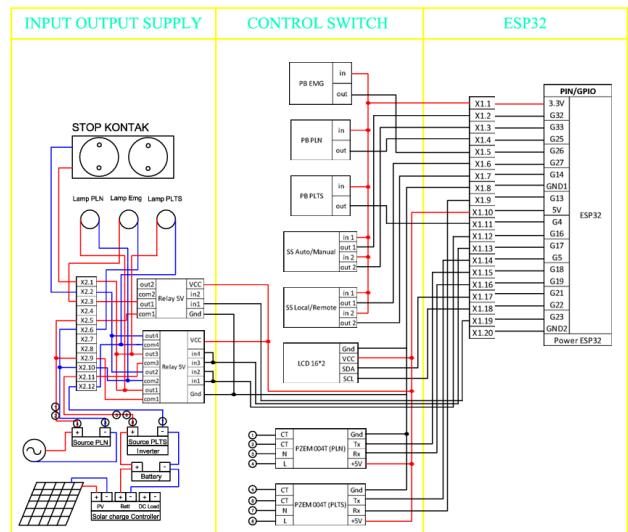
Bagian dalam panel berisi perangkat kontrol dan pendukung sistem, antara lain:

- Mikrokontroler ESP32
- Dua modul sensor PZEM-004T untuk pembacaan parameter listrik PLN dan PLTS
- Relay 5VDC untuk switching daya
- Switching power supply 5VDC/10A
- Terminal blok dan kabel konektor

Penataan internal dilakukan dengan pendekatan wiring terstruktur dan minim tumpang tindih. Kabel diberi label dan nomor untuk memudahkan identifikasi selama proses instalasi dan troubleshooting. Seluruh komponen di tempatkan di dalam panel dengan memperhatikan alur sirkuit, kemudahan akses, serta jarak aman antar perangkat untuk mencegah interferensi atau gangguan mekanis.

D. Perancangan Elektrikal

Perancangan elektrikal pada sistem *Automatic Transfer Switch* (ATS) berbasis ESP32 difokuskan pada integrasi antara sistem kontrol digital dan sirkuit tenaga, guna mendukung pemindahan sumber daya listrik secara otomatis maupun manual dengan tetap mempertahankan aspek keamanan, keandalan, dan efisiensi.



Gambar 1. Wiring Loop Diagram

Sistem terdiri atas dua sumber utama, yaitu PLN (listrik jaringan) dan PLTS (listrik tenaga surya). Tegangan AC 220V dari kedua sumber ini digunakan untuk menyuplai beban, dan pemilihannya dikendalikan melalui relay 5VDC yang diaktifkan oleh mikrokontroler ESP32. Adapun perangkat-perangkat elektronik lainnya, seperti sensor, LCD, dan ESP32, menggunakan sumber tegangan DC 5V, yang diperoleh dari power supply switching 5V 10A.

1. Mikrokontroler ESP32 sebagai Pusat Kendali

ESP32 berfungsi sebagai unit pemroses utama yang menerima sinyal input dari komponen fisik dan sensor, serta menghasilkan sinyal output untuk mengaktifkan aktuator. Input digital dari push button, selector switch, dan emergency button dikoneksikan ke pin-pin GPIO yang telah disesuaikan berdasarkan fungsinya. Selector switch terhubung ke GPIO27, GPIO14, GPIO32, dan GPIO33; push button PLN dan PLTS masing-masing terhubung ke GPIO25 dan GPIO4; sedangkan emergency button yang bekerja dalam kondisi Normally Closed dengan konfigurasi pull-up dihubungkan ke GPIO26. Untuk mengendalikan aktuator berupa relay, ESP32 menggunakan GPIO16 dan GPIO17 masing-masing untuk relay PLN dan PLTS, serta GPIO23 untuk relay emergency.

2. Sensor Parameter Listrik PZEM-004T

Sensor yang digunakan dalam sistem ini adalah PZEM-004T, yang berfungsi untuk memantau parameter kelistrikan dari dua sumber utama, yaitu PLN dan PLTS. Masing-masing sensor memonitor tegangan, arus, daya aktif, energi, frekuensi, dan faktor daya.

Sensor ini menggunakan komunikasi TTL serial dan dihubungkan secara langsung ke dua jalur UART ESP32 untuk menghindari konflik data. Sensor PZEM untuk sumber PLN dihubungkan melalui pin TX sensor ke RX ESP32 (GPIO18) dan RX sensor ke TX ESP32 (GPIO19). Sementara itu, sensor PZEM untuk sumber PLTS terhubung melalui TX sensor ke RX ESP32 (GPIO5) dan RX sensor ke TX ESP32 (GPIO13). Konfigurasi ini memungkinkan pembacaan data simultan dari dua sensor secara stabil.

3. Output Switching dan Indikasi

Sinyal output dari ESP32 yang digunakan untuk mengaktifkan relay juga dihubungkan ke lampu indikator (pilot lamp) yang menunjukkan sumber daya mana yang sedang aktif. Relay dan pilot lamp untuk sumber PLN dikendalikan melalui GPIO16, untuk sumber PLTS melalui GPIO17, dan untuk mode emergency melalui GPIO23. Dengan konfigurasi ini, pengguna dapat secara visual mengetahui status sumber daya secara langsung dari panel sistem.

4. Tampilan dan Komunikasi Lokal

Tampilan lokal informasi sistem disediakan oleh LCD 16x2 yang terhubung menggunakan protokol I2C, dengan pin SDA terhubung ke GPIO21 dan SCL ke GPIO22. LCD ini berfungsi untuk menampilkan status sumber daya yang sedang digunakan, mode operasi (manual/otomatis), serta informasi penting lainnya yang relevan bagi operator sistem.

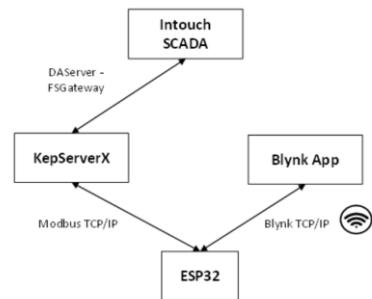
5. Sumber Daya Alternatif dari PLTS

Sumber PLTS terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu panel surya 100 WP sebagai pembangkit energi, charge controller SCC PWM BLS 20A sebagai pengatur pengisian baterai, satu buah baterai aki sebagai penyimpan energi, dan inverter 1000W untuk mengubah tegangan DC dari baterai menjadi AC 220V. Energi yang disimpan dalam baterai diubah melalui inverter dan menjadi alternatif sumber daya AC untuk sistem. Output dari inverter ini juga dipantau menggunakan sensor PZEM-004T yang sama dengan sensor untuk PLN.

Dengan kombinasi pengendalian lokal dan remote ini, sistem dapat menjamin kontinuitas pasokan listrik, pemantauan parameter secara real-time, dan fleksibilitas pengoperasian baik dari lokasi fisik panel maupun dari jarak jauh.

E. Perancangan Software

Perancangan perangkat lunak dalam sistem *Automatic Transfer Switch* (ATS) ini berfokus pada integrasi kontrol logika, komunikasi data, serta antarmuka pengguna untuk pemantauan dan pengendalian sistem secara lokal maupun jarak jauh. Perangkat lunak dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali utama, yang diprogram melalui platform Arduino IDE dengan bahasa pemrograman C++. Sistem ini mendukung komunikasi dua arah antara ESP32 dengan dua platform pengguna, yaitu *SCADA Wonderware InTouch* dan aplikasi *Blynk IoT*, untuk memenuhi kebutuhan pemantauan secara real-time serta kontrol fleksibel dari berbagai lokasi.



Gambar 6. Arsitektur sistem

Arsitektur perangkat lunak seperti gambar 6. dirancang agar ESP32 dapat terhubung ke jaringan WiFi dan melakukan komunikasi data berbasis protokol TCP/IP. Pada komunikasi lokal, ESP32 berperan sebagai *Modbus TCP slave* yang diakses oleh middleware *KepServerEX*. Middleware ini menjembatani koneksi antara ESP32 dan *Wonderware InTouch* sebagai antarmuka SCADA menggunakan protokol OPC melalui *FS Gateway*. Dengan demikian, seluruh parameter listrik seperti tegangan, arus, daya, frekuensi, energi, dan status switching dapat dimonitor dan dikendalikan secara langsung dari HMI SCADA secara real-time.

Sementara itu, untuk pengendalian jarak jauh berbasis cloud, ESP32 terhubung ke platform *Blynk IoT* menggunakan library *BlynkSimpleEsp32.h*. Komunikasi dilakukan melalui protokol TCP/IP dengan autentikasi menggunakan token yang diberikan oleh aplikasi *Blynk*. Dalam platform ini, data dari ESP32 dikirim ke cloud dan ditampilkan pada dashboard *Blynk* dalam bentuk widget, seperti tombol kontrol virtual, indikator status, dan tampilan nilai parameter listrik. Setiap komponen pada panel seperti push button, relay, pilot lamp, dan sensor direpresentasikan dalam program sebagai virtual pin yang terhubung dengan antarmuka aplikasi mobile.

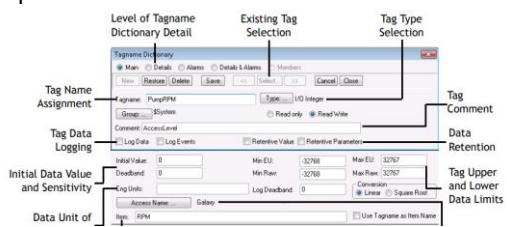
Tabel 1. I/O Address

No.	Komponen	Jenis	GPIO ESP32	Default State	Fungsi
1	Relay PLN / Pilot Lamp PLN	Digital Out	GPIO16	LOW	Kendali PLN dan indikator lampu
2	Relay PLTS / Pilot Lamp PLTS	Digital Out	GPIO17	LOW	Kendali PLTS dan indikator lampu
3	Relay Emergency / Pilot Lamp	Digital Out	GPIO23	LOW	Relay pemutus darurat
4	Selector Switch Local	Digital In	GPIO27	LOW (pulldown)	Mode lokal
5	Selector Switch Remote	Digital In	GPIO14	LOW (pulldown)	Mode remote
6	Selector Switch Auto	Digital In	GPIO32	LOW (pulldown)	Mode otomatis
7	Selector Switch Manual	Digital In	GPIO33	LOW (pulldown)	Mode manual
8	Emergency Button (NC)	Digital In	GPIO26	HIGH (pullup)	Emergency aktif saat LOW

No.	Komponen	Jenis	GPIO ESP32	Default State	Fungsi
9	Push Button PLN	Digital In	GPIO25	LOW (pulldown)	Kendali PLN manual (toggle)
10	Push Button PLTS	Digital In	GPIO4	LOW (pulldown)	Kendali PLTS manual (toggle)
11	PZEM-004T PLN (TX)	UART RX	GPIO18	-	Terhubung ke TX PZEM PLN
12	PZEM-004T PLN (RX)	UART TX	GPIO19	-	Terhubung ke RX PZEM PLN
13	PZEM-004T PLTS (TX)	UART RX	GPIO5	-	Terhubung ke TX PZEM PLTS
14	PZEM-004T PLTS (RX)	UART TX	GPIO13	-	Terhubung ke RX PZEM PLTS
15	LCD I2C SDA	I2C	GPIO21	-	Data LCD
16	LCD I2C SCL	I2C	GPIO22	-	Clock LCD

Untuk menjembatani komunikasi fisik dan logika program, perangkat lunak melakukan pemetaan alamat I/O yang jelas terhadap semua input dan output sistem. GPIO pada ESP32 digunakan untuk membaca sinyal dari push button, selector switch, dan emergency button, serta mengendalikan relay switching dan LCD. Input digital seperti tombol dan switch menggunakan konfigurasi pull-up atau pull-down untuk memastikan kestabilan logika. Sedangkan output dikendalikan melalui pin yang ditetapkan secara eksplisit dalam program untuk memastikan kendali yang presisi.

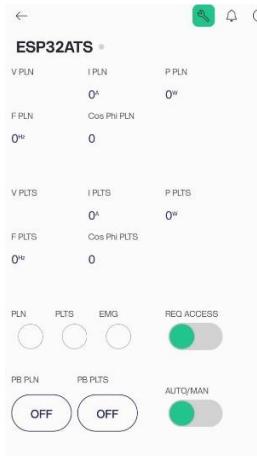
Dalam program utama ESP32, proses diawali dengan inisialisasi semua pustaka (library) pendukung, termasuk WiFi, Blynk, Modbus TCP, PZEM004T, dan LCD I2C. Setup koneksi jaringan dilakukan untuk memastikan perangkat dapat terhubung dengan cloud dan sistem SCADA. Setelah inisialisasi berhasil, perangkat lunak akan membaca status input dan parameter kelistrikan dari dua sensor PZEM-004T secara terus menerus. Berdasarkan kondisi ini, sistem akan memutuskan apakah switching dilakukan ke sumber PLN atau PLTS, tergantung mode operasi yang dipilih—manual atau otomatis, lokal maupun remote.



Gambar 7. Tagname Intouch

Untuk kebutuhan SCADA, data parameter dikirim dari ESP32 melalui protokol Modbus TCP menggunakan library ModbusIP_ESP8266.h, yang meskipun dikembangkan untuk ESP8266, kompatibel digunakan pada ESP32. Data digital dikonfigurasi sebagai coil, dan data analog sebagai holding

register, yang kemudian dibaca oleh KepServerEX dan dikirim ke Wonderware InTouch melalui FS Gateway. Di sisi SCADA, semua variabel yang diterima dimapping dalam Tagname Dictionary seperti di gambar 7. untuk digunakan dalam objek grafis HMI yang menampilkan status sistem secara visual dan interaktif.



Gambar 8. Blynk

Sementara itu, komunikasi dengan aplikasi Blynk serta visual yang dapat dilihat di gambar 8. dilakukan melalui virtual pin yang mewakili status input, output, dan parameter sistem. ESP32 mengirimkan data seperti tegangan dan arus ke virtual pin untuk ditampilkan di gauge atau value display, serta menerima perintah switching dari tombol virtual pengguna untuk mengaktifkan relay sesuai mode operasi.

Keseluruhan sistem perangkat lunak pada ATS ini dirancang modular dan terstruktur, memungkinkan skalabilitas untuk penambahan fitur di masa mendatang. Dengan integrasi antara logika pemrosesan data real-time, komunikasi dua arah melalui TCP/IP, dan antarmuka pengguna berbasis SCADA maupun IoT, sistem ATS dapat beroperasi secara andal dalam berbagai skenario kontrol dan pemantauan, baik di lokasi maupun secara remote melalui jaringan internet.

III. HASIL DAN ANALISA

Proses pengujian terhadap sistem yang telah dirancang dan diimplementasikan memegang peranan penting dalam menentukan keberhasilan dari keseluruhan rancangan. Tahap ini bertujuan untuk memastikan bahwa baik perangkat keras (hardware) maupun perangkat lunak (software) mampu bekerja secara optimal dan sesuai dengan spesifikasi teknis yang telah ditetapkan. Pengujian juga menjadi dasar untuk mengevaluasi apakah sistem perlu dilakukan penyesuaian, perbaikan, atau pengembangan lebih lanjut.

Selama proses pengujian, dilakukan serangkaian pengukuran, observasi, dan pencatatan data terhadap berbagai parameter, termasuk tegangan suplai, waktu respons switching, serta stabilitas integrasi antara sensor, mikrokontroler ESP32, dan antarmuka aplikasi pemantauan seperti SCADA Wonderware InTouch dan Blynk IoT. Hasil dari pengujian ini kemudian dianalisis untuk menilai performa sistem dalam kondisi nyata, baik dalam mode lokal maupun remote, serta dalam operasi manual maupun otomatis.

Proses pengujian terhadap sistem yang telah dirancang dan diimplementasikan memegang peranan penting dalam menentukan keberhasilan dari keseluruhan rancangan. Tahap ini bertujuan untuk memastikan bahwa baik perangkat keras (hardware) maupun perangkat lunak (software) mampu bekerja secara optimal dan sesuai dengan spesifikasi teknis yang telah ditetapkan. Pengujian juga menjadi dasar untuk mengevaluasi apakah sistem perlu dilakukan penyesuaian, perbaikan, atau pengembangan lebih lanjut.

Proses pengujian terhadap sistem yang telah dirancang dan diimplementasikan memegang peranan penting dalam menentukan keberhasilan dari keseluruhan rancangan. Tahap ini bertujuan untuk memastikan bahwa baik perangkat keras (hardware) maupun perangkat lunak (software) mampu bekerja secara optimal dan sesuai dengan spesifikasi teknis yang telah ditetapkan. Pengujian juga menjadi dasar untuk mengevaluasi apakah sistem perlu dilakukan penyesuaian, perbaikan, atau pengembangan lebih lanjut.

A. Pengujian Hardware

Pengujian perangkat keras dilakukan secara menyeluruh untuk memastikan bahwa seluruh komponen fisik dalam sistem ATS berbasis IoT dan SCADA berfungsi sesuai dengan rancangan. Komponen yang diuji meliputi sensor PZEM-004T, push button, selector switch, emergency button, relay 5VDC, pilot lamp, LCD 16x2, mikrokontroler ESP32, serta sistem kelistrikan panel yang terhubung ke sumber listrik utama (PLN) dan sumber cadangan (PLTS). Pengujian dilakukan dalam dua mode, yakni mode otomatis dan mode manual, dengan pendekatan bertahap untuk mengamati performa sistem secara komprehensif.

Langkah awal pengujian dimulai dari pemeriksaan power supply 5VDC, yang merupakan sumber daya utama bagi komponen seperti ESP32, LCD, dan relay. Setelah dilakukan instalasi dan pemberian tegangan input 220 VAC, dilakukan pengukuran output menggunakan multimeter sebanyak tujuh kali. Hasil pengukuran menunjukkan tegangan rata-rata sebesar 4.97 VDC. Nilai ini berada dalam batas toleransi yang dapat diterima, sehingga dapat disimpulkan bahwa power supply berfungsi dengan stabil dan mampu menyediakan tegangan yang konsisten seperti pada tabel 2. Stabilitas ini sangat penting karena fluktuasi daya pada tahap awal dapat menyebabkan gangguan pada fungsi logika dan switching.

Tabel 2. Data Vout power supply

Pengujian ke-	Power supply (V)
1	5
2	5
3	4.9
4	4.9
5	5
6	5
7	5
Tegangan rata rata (V)	4.97

Selanjutnya, dilakukan pengujian kelayakan terhadap komponen utama seperti ESP32, LCD, dan relay untuk memastikan bahwa komponen-komponen tersebut aktif dan merespons sebagaimana mestinya seperti pada tabel 3. Dalam

setiap percobaan, dilakukan penyalan sistem dan observasi terhadap indikator LED, bunyi klik pada relay, serta tampilan awal pada LCD. Hasilnya menunjukkan bahwa semua komponen menyala sempurna tanpa adanya kegagalan fungsi selama lima kali pengujian berturut-turut. Hal ini membuktikan bahwa sistem kelistrikan dasar telah terpasang dengan benar dan komponen layak untuk digunakan dalam sistem otomatisasi switching.

Tabel 3. Data kelayakan komponen

Komponen	Pengujian Ke-					Indikator berfungsi/layak
	1	2	3	4	5	
ESP32	✓	✓	✓	✓	✓	Lampu ESP menyala
LCD 16x2	✓	✓	✓	✓	✓	LCD menyala
Relay PLN	✓	✓	✓	✓	✓	Lampu relay menyala
Relay PLN	✓	✓	✓	✓	✓	Lampu relay menyala
Relay Lamp	✓	✓	✓	✓	✓	Lampu relay menyala

Pengujian berikutnya difokuskan pada fungsi input dan output sistem, dengan meng-upload program kontrol ke dalam ESP32 untuk mendukung mode otomatis dan manual. Sistem diuji dengan memberikan input dari selector switch dan push button, kemudian diamati output berupa aktivasi relay dan perubahan status indikator. Data dari sensor PZEM-004T juga dimonitor secara real-time melalui serial monitor dan LCD. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa setiap input dapat dideteksi secara akurat dan output switching bekerja sesuai perintah, baik dalam mode otomatis berdasarkan data sensor maupun dalam mode manual melalui tombol kontrol seperti pada tabel 4. Ini menandakan bahwa sistem telah berhasil mengintegrasikan antara input fisik, logika pemrograman, dan aktuator secara harmonis.

Tabel 4. Data input dan output

No	Input	Status output	keterangan
1	Selector Local	Serial monitor Detect	Berfungsi
2	Selector Remote	Serial monitor Detect	Berfungsi
3	Selector Auto	Serial monitor Detect	Berfungsi
4	Selector Manual	Serial monitor Detect	Berfungsi
5	Sensor PZEM 004T PLN	Nilai kadar kelembapan	Berfungsi
6	Sensor PZEM 004T PLTS	Nilai kadar kelembapan	Berfungsi
7	Push Button PLN	Serial monitor Detect	Berfungsi
8	Push Button PLTS	Serial monitor Detect	Berfungsi
9	Relay PLN	Switching	Berfungsi
10	Relay PLTS	Switching	Berfungsi

Komponen LCD juga diuji dalam berbagai skenario tampilan, mulai dari menampilkan kondisi beban, parameter listrik seperti tegangan dan arus, hingga peringatan darurat saat terjadi gangguan. LCD mampu menampilkan informasi secara jelas dan konsisten, baik dalam mode manual maupun otomatis. Bahkan ketika terjadi kondisi abnormal, LCD secara otomatis menampilkan pesan "Periksa Panel" sebagai sistem peringatan visual. Keberhasilan ini menunjukkan bahwa LCD telah berfungsi optimal sebagai antarmuka pengguna dan telah diintegrasikan dengan logika sistem secara efektif.

Tabel 5. Data tampilan LCD

Tampilan	Kriteria pengujian	Hasil pengujian	keterangan
Awal	LCD menampilkan tampilan awal	LCD menampilkan teks sebagai berikut: "Smart ATS With PZEM 004T dan Loading"	Berfungsi
Cek Kondisi dan Parameter	Ketika mode auto LCD menampilkan nilai parameter dari masing-masing sensor	LCD menampilkan data berupa nilai kelembapan dengan format sebagai berikut: "Voltage: 210.70V Current: 0.07A" "Power: 4.00W Energy: 0.002kwh" "Frequency: 59.9Hz PF: 0.47"	Berfungsi
	Ketika mode manual LCD menampilkan kondisi dari masing-masing Supply (hidup/mati)	LCD menampilkan data berupa status kondisi beban dengan format sebagai berikut: "PLN: ON/OFF" "PLTS: ON/OFF"	Berfungsi
Peringatan	LCD menampilkan peringatan jika nilai dalam kondisi Emergency	LCD menampilkan teks sebagai berikut: "Periksa Panel"	Berfungsi

Sensor PZEM-004T diuji dengan menyambungkannya ke jalur listrik PLN dan PLTS, serta dipasok dengan tegangan 5 VDC. Program pembacaan data berbasis Modbus dikirim ke ESP32 untuk mengamati parameter listrik seperti tegangan,

arus, daya aktif, dan frekuensi. Pengujian dilakukan dalam tiga kondisi: sistem dalam keadaan steady tanpa beban, saat PLN padam, dan saat PLTS aktif sebagai sumber cadangan. Dalam ketiga skenario, sensor berhasil mendeteksi perubahan kondisi dengan akurat dan mengirimkan data ke ESP32 secara real-time, yang selanjutnya digunakan untuk pengambilan keputusan switching. Hasil ini memperlihatkan bahwa sensor mampu menjadi komponen inti dalam sistem monitoring dan kontrol otomatis.

Tabel 6. Nilai status kondisi beban

No	Kondisi sensor (Tegangan)	Hasil pengujian	Keterangan
1	Tegangan > 220	Relay PLN ON, Relay PLTS OFF	PLN aktif normal, PLTS standby
2	Tegangan > 220	Relay PLN ON, Relay PLTS OFF	PLN aktif normal, PLTS standby
3	Tegangan > 220	Relay PLN ON, Relay PLTS OFF	PLN aktif normal, PLTS standby
4	Tegangan < 220	Relay PLN OFF, Relay PLTS ON	PLN non aktif, PLTS aktif
5	Tegangan < 220	Relay PLN OFF, Relay PLTS ON	PLN non aktif, PLTS aktif
6	Tegangan < 220	Relay PLN OFF, Relay PLTS ON	PLN non aktif, PLTS aktif
7	Tegangan > 220	Relay PLN ON, Relay PLTS OFF	PLN aktif normal, PLTS standby

Uji coba switching otomatis juga menunjukkan hasil yang positif. Saat tegangan PLN berada dalam rentang normal, sistem secara otomatis mengaktifkan relay untuk menyambungkan sumber PLN. Namun ketika tegangan turun di bawah ambang batas, sistem segera memutuskan koneksi PLN dan beralih ke PLTS. Perpindahan ini terjadi dalam waktu cepat tanpa kendala, menunjukkan bahwa logika program pada ESP32 berjalan sesuai dengan desain. Selain mode otomatis, sistem juga diuji dalam mode manual, baik melalui tombol fisik maupun secara remote menggunakan aplikasi Blynk dan SCADA Wonderware InTouch. Pada kedua skenario tersebut, semua perintah berhasil diterima dan dijalankan oleh sistem, dengan switching output yang sesuai dan tanpa delay yang signifikan.

Tabel 7. Nilai status kondisi beban manual

Akses Kendali	Mode Kendali	Trigger kendali	Hasil pengujian	Keterangan
Manual	Push Button PLN	Local	Relay PLN ON, Relay	PLN aktif normal,

Akses Kendali	Mode Kendali	Trigger kendali	Hasil pengujian	Keterangan
			PLTS OFF	PLTS standby
Manual	Push Button PLTS	Local	Relay PLN OFF, Relay PLTS ON	PLN non aktif, PLTS aktif
Manual (Blynk)	Virtual PB PLN	Remote	Relay PLN ON, Relay PLTS OFF	PLN aktif normal, PLTS standby
Manual (Blynk)	Virtual PB PLTS	Remote	Relay PLN OFF, Relay PLTS ON	PLN non aktif, PLTS aktif
Manual (InTouch)	Button PLN	Remote	Relay PLN ON, Relay PLTS OFF	PLN aktif normal, PLTS standby
Manual (InTouch)	Button PLTS	Remote	Relay PLN OFF, Relay PLTS ON	PLN non aktif, PLTS aktif

Secara keseluruhan, hasil pengujian perangkat keras menunjukkan bahwa seluruh komponen sistem ATS telah berfungsi sesuai perencanaan. Setiap bagian dari sistem, mulai dari sensor, mikrokontroler, indikator, hingga antarmuka monitoring, mampu bekerja secara sinergis dalam kedua mode operasional. Keberhasilan pengujian ini menunjukkan bahwa sistem layak untuk diimplementasikan dalam skala nyata dan memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut dalam pengelolaan energi berbasis IoT dan SCADA, khususnya dalam integrasi energi terbarukan seperti PLTS sebagai backup sumber utama.

B. Pengujian Software

Pengujian perangkat lunak pada sistem ATS berbasis ESP32 difokuskan pada tiga platform utama, yaitu pemrograman mikrokontroler melalui Arduino IDE, pemantauan lokal berbasis SCADA Wonderware InTouch dengan integrasi KepServerX, serta kontrol dan monitoring jarak jauh menggunakan aplikasi Blynk IoT. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi keakuratan pemrosesan logika, kestabilan komunikasi data, serta kemampuan integrasi dan respons kendali dari masing-masing platform terhadap perangkat keras yang telah dirancang. Setiap platform diuji secara terpisah dan bersama-sama untuk memastikan bahwa sistem dapat berjalan secara sinkron dan responsif baik secara lokal maupun remote.

Tahapan pertama dalam pengujian software dilakukan melalui pemrograman ESP32 menggunakan Arduino IDE. Program yang dikembangkan mencakup logika switching otomatis berdasarkan pembacaan data sensor PZEM-004T, serta pengendalian manual melalui push button dan sistem IoT.

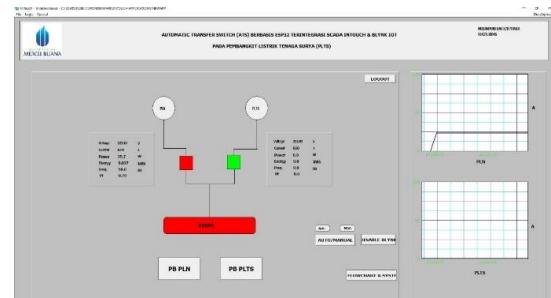
Setelah program diunggah ke dalam ESP32, dilakukan pemantauan melalui serial monitor seperti pada gambar 9. untuk memverifikasi apakah setiap instruksi berjalan sesuai perintah. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semua masukan dari sensor maupun tombol dapat terdeteksi dengan tepat dan memberikan output yang akurat terhadap relay switching. Logika pengambilan keputusan juga berhasil dijalankan tanpa kesalahan atau keterlambatan proses selama runtime. Seluruh proses kontrol menunjukkan stabilitas, baik saat membaca parameter kelistrikan maupun saat melakukan switching antara PLN dan PLTS.



```
18:27:58.522 ->
18:27:58.519 -> └── STATUS I/O ──
18:27:58.519 -> SW Local : 1
18:27:58.561 -> SW Remote : 1
18:27:58.561 -> SW Auto : 1
18:27:58.564 -> SW Manual : 1
18:27:58.564 -> PB EMG : 1
18:27:58.564 -> PB PLN : 0
18:27:58.564 -> PB PLTS : 1
18:27:58.564 -> Relay PLN : 0
18:27:58.564 -> Relay PLTS : 0
18:27:58.564 -> Relay WNG : 0
18:27:58.564 ->
```

Gambar 9. Serial monitor ESP32

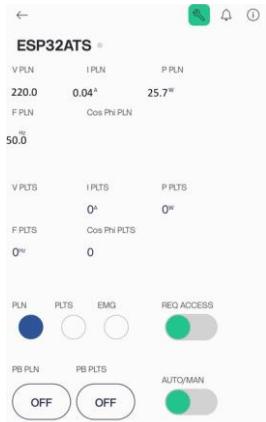
Selanjutnya, pengujian dilakukan pada sistem SCADA berbasis Wonderware InTouch yang terhubung ke ESP32 melalui middleware KepServerX menggunakan protokol komunikasi Modbus TCP/IP. Dalam proses ini, parameter-parameter kelistrikan seperti tegangan, arus, daya aktif, frekuensi, dan power factor yang dikirim oleh sensor PZEM-004T berhasil ditampilkan dalam bentuk antarmuka grafis pada layar SCADA seperti gambar 10. Selain monitoring, fitur kendali ON/OFF pada sumber daya juga berhasil dijalankan melalui tombol virtual yang tersedia pada tampilan InTouch. Semua perintah yang diberikan dari SCADA diteruskan dengan cepat ke ESP32 dan menghasilkan aksi switching yang sesuai di sisi perangkat keras. Hal ini membuktikan bahwa komunikasi dua arah antara sistem kontrol lokal dan mikrokontroler telah terbangun secara efektif dan mampu mendukung sistem pengendalian otomatis yang handal.



Gambar 10. Tampilan nilai dan status SCADA

Pada sisi lain, aplikasi Blynk IoT juga menunjukkan performa yang sangat baik dalam mendukung monitoring dan kendali jarak jauh seperti gambar 11. Dengan menyambungkan ESP32 ke jaringan internet dan mengintegrasikan token proyek Blynk, dilakukan pengujian terhadap fungsi-fungsi utama seperti pembacaan parameter kelistrikan dan eksekusi perintah switching. Aplikasi Blynk menampilkan informasi secara real-time yang identik dengan data pada SCADA, dan memberikan kontrol langsung melalui tombol virtual untuk memilih sumber daya secara manual. Respons dari sistem terhadap perintah jarak

jauh sangat cepat, tanpa ditemukan delay yang mengganggu, bahkan ketika diuji dalam waktu yang berbeda atau pada kondisi jaringan internet yang bervariasi. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi sistem IoT berjalan secara stabil dan dapat diandalkan untuk pemantauan sistem kelistrikan dari lokasi manapun.



Gambar 11. Runtime Blynk

Pengujian juga dilakukan terhadap integrasi seluruh sistem secara bersamaan, yakni dengan menjalankan ESP32, SCADA InTouch, dan Blynk secara simultan. Hasilnya menunjukkan bahwa ketiga platform dapat berjalan sinkron tanpa terjadi konflik atau inkonsistensi data. Perubahan status dari satu platform langsung tercermin pada platform lainnya, baik dalam hal tampilan parameter maupun status switching. Pengujian ini menegaskan bahwa sistem telah berhasil mengimplementasikan konsep kontrol terdistribusi yang efisien dengan dukungan komunikasi data berbasis TCP/IP.

Secara keseluruhan, hasil pengujian software menunjukkan bahwa seluruh fungsi perangkat lunak telah bekerja secara optimal dan sesuai dengan rancangan. Semua platform mampu berkomunikasi dengan baik dengan ESP32 sebagai pusat kendali, dan mendukung fungsi monitoring serta kendali dari dua arah, baik secara lokal menggunakan SCADA maupun secara remote melalui aplikasi IoT. Keberhasilan ini menunjukkan bahwa pemilihan platform, desain logika program, dan protokol komunikasi yang digunakan telah tepat, sehingga sistem ATS yang dikembangkan memiliki kinerja yang

stabil, fleksibel, dan handal untuk aplikasi pengelolaan sumber daya listrik berbasis IoT dan SCADA.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem Automatic Transfer Switch (ATS) berbasis ESP32 yang terintegrasi dengan SCADA Wonderware InTouch untuk pemantauan lokal dan Blynk IoT untuk kontrol jarak jauh, dapat disimpulkan bahwa sistem telah berhasil memenuhi seluruh tujuan dan batasan dalam penelitian ini. Sistem ATS mampu beroperasi dalam dua mode, yaitu otomatis dan manual, serta mendukung dua metode pengendalian: lokal melalui panel fisik dan remote melalui aplikasi SCADA dan IoT. Sensor PZEM-004T berhasil membaca parameter kelistrikan secara real-time dari dua sumber, yaitu PLN dan PLTS. Fitur kendali manual melalui push button maupun kendali jarak jauh melalui SCADA dan Blynk juga bekerja dengan baik tanpa konflik logika atau keterlambatan. Secara keseluruhan, sistem ATS ini terbukti layak dijadikan sebagai prototipe manajemen daya listrik berbasis IoT dan SCADA, terutama untuk sistem hybrid PLN–PLTS pada skala laboratorium. Kombinasi ESP32, sensor PZEM-004T, serta integrasi dengan SCADA dan IoT menghasilkan sistem yang responsif, akurat, dan andal dalam mendukung pengelolaan energi modern.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Prasetyo, *Dasar sistem kontrol otomatis*. 2018.
- [2] Blynk, “Getting started with Blynk IoT platform.” [Online]. Available: <https://docs.blynk.io>
- [3] Wonderware by AVEVA, “InTouch SCADA system overview.” [Online]. Available: <https://www.aveva.com>
- [4] A. J. Watkins, “Power factor,” *Electr. Install. Calc. Basic*, pp. 86–88, 2020, doi: 10.4324/9780080953953-15.
- [5] D. Saputra, “Internet of Things dan SCADA untuk kendali sistem energi,” 2021.
- [6] Kepware Technologies, “KepServerEX user manual,” 2020.
- [7] W. Sutopo, “Manajemen Proyek Sistem Otomasi,” 2016.
- [8] E. Turban and L. Volonino, *Information Technology for Management*, vol. 8. 2011.
- [9] P. Zheng *et al.*, “Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives,” *Front. Mech. Eng.*, vol. 13, no. 2, pp. 137–150, 2018, doi: 10.1007/s11465-018-0499-5.