

Makalah Ilmiah Populer

Implementasi Protokol Nirkabel ESP-NOW dan Antarmuka LVGL pada Sistem Monitoring dan Kontrol Terdistribusi Portal Pengawas Radiasi Berbasis ESP32

*Artikel ilmiah ini disusun dalam rangka
untuk pemenuhan capaian kinerja mahasiswa*



Poltek Nuklir

Disusun pada tanggal 5 Juli 2026 oleh :
Muhammad Meisandi Baihaqi / Elektronika Instrumentasi / 022300009

Dosen Pengampu/Pembimbing :

Budi Suhendro, S.ST.,M.Kom

**POLITEKNIK TEKNOLOGI NUKLIR INDONESIA
BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL
YOGYAKARTA
2026**

**LEMBAR PERSETUJUAN
MAKALAH ILMIAH**

**Implementasi Protokol Nirkabel ESP-NOW dan Antarmuka LVGL pada
Sistem Monitoring dan Kontrol Terdistribusi Portal Pengawas Radiasi
Berbasis ESP32**

Disusun oleh
Muhammad Meisandi Baihaqi / Elektronika Instrumentasi / 022300009

Telah diperiksa dan disetujui pada tanggal 10 Juli 2026 oleh:

Dosen Pembimbing/Dosen Pengampu Matakuliah



Budi Suhendro, S.ST.,M.Kom
NIP. 197206071992121004

IMPLEMENTASI PROTOKOL IMPLEMENTASI PROTOKOL NIRKABEL ESP-NOW DAN ANTARMUKA LVGL PADA SISTEM MONITORING DAN KONTROL TERDISTRIBUSI PORTAL PENGAWAS RADIASI BERBASIS ESP32

IMPLEMENTATION OF THE ESP-NOW WIRELESS PROTOCOL AND LVGL INTERFACE IN AN ESP32-BASED DISTRIBUTED MONITORING AND CONTROL SYSTEM FOR RADIATION PORTAL MONITORS

Muhammad Meisandi Baihaqi¹, Budi Suhendro, S.ST., M.Kom²

¹Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia - Jl. Babarsari i Kotak POB 6101/YKBB, Ngentak, Caturtunggal, Kecamatan Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55281

*E-mail korespondensi: meisandibaihaqi09@gmail.com

ABSTRAK

IMPLEMENTASI PROTOKOL NIRKABEL ESP-NOW DAN GUI LVGL PADA SISTEM KONTROL TERDISTRIBUSI PORTAL PENGAWAS RADIASI BERBASIS ESP32. Portal pengawas radiasi memerlukan sistem kontrol yang mampu melakukan monitoring dan pengendalian secara real-time dengan arsitektur yang fleksibel serta mudah dikembangkan. Penelitian ini bertujuan mengimplementasikan protokol komunikasi nirkabel ESP-NOW dan antarmuka grafis Light and Versatile Graphics Library (LVGL) pada sistem kontrol terdistribusi portal pengawas radiasi berbasis ESP32. Sistem dirancang menggunakan satu ESP32 sebagai master yang berfungsi sebagai pusat kendali dan antarmuka pengguna, serta dua ESP32 sebagai slave yang menangani akuisisi data sensor dan pengendalian aktuator. Komunikasi antar node dilakukan menggunakan ESP-NOW tanpa memerlukan access point, sedangkan GUI dikembangkan menggunakan LVGL untuk menampilkan informasi sistem dan menyediakan fitur monitoring serta pengendalian melalui layar sentuh. Hasil implementasi menunjukkan bahwa komunikasi antar node berhasil dilakukan secara stabil, sedangkan GUI mampu menampilkan parameter sistem dan menjalankan fungsi kontrol sesuai perintah operator. Berdasarkan pengujian fungsional, seluruh fitur utama sistem meliputi komunikasi ESP-NOW, monitoring sensor, pembaruan antarmuka, dan pengendalian aktuator berhasil diimplementasikan sesuai dengan rancangan. Dengan demikian, integrasi ESP-NOW dan LVGL mampu menghasilkan sistem kontrol terdistribusi yang sederhana, responsif, dan berpotensi mendukung pengembangan portal pengawas radiasi berbasis embedded system.

Kata kunci: ESP32, ESP-NOW, LVGL, Sistem Kontrol Terdistribusi, Human–Machine Interface, Portal Pengawas Radiasi.

ABSTRACT

IMPLEMENTATION OF ESP-NOW WIRELESS PROTOCOL AND LVGL GUI IN AN ESP32-BASED DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM FOR A RADIATION MONITORING PORTAL. Radiation monitoring portals require a control system capable of performing real-time monitoring and operation while providing a flexible and scalable architecture. This study aims to implement the ESP-NOW wireless communication protocol and the Light and Versatile Graphics Library (LVGL) graphical user interface in an ESP32-based distributed control system for a radiation monitoring portal. The system consists of one ESP32 as the master node responsible for system control and user interface, and two ESP32 slave nodes for sensor data acquisition and actuator control. Communication between nodes is established using ESP-NOW without requiring an access point, while the graphical interface is developed using LVGL to provide real-time monitoring and touchscreen-based control. The implementation results demonstrate that ESP-NOW enables stable communication among distributed nodes, while the LVGL interface successfully displays system parameters and executes control commands according to operator inputs. Functional testing confirms that all major system features, including wireless communication, sensor monitoring, interface updates, and actuator control, operate as designed. Therefore, the integration of ESP-NOW and LVGL provides a simple, responsive, and scalable distributed control system suitable for embedded radiation monitoring portal applications.

Keywords: ESP32, ESP-NOW, LVGL, Distributed Control System, Human–Machine Interface, Radiation Monitoring Portal.

PENDAHULUAN

Perkembangan pemanfaatan teknologi nuklir dalam bidang kesehatan, industri, penelitian, maupun keamanan mendorong meningkatnya kebutuhan terhadap sistem proteksi radiasi yang mampu bekerja secara cepat,

akurat, dan andal. Salah satu perangkat yang banyak digunakan untuk mendukung sistem keamanan tersebut adalah Radiation Portal Monitor (RPM) [1], yaitu sistem yang dirancang untuk mendeteksi keberadaan material radioaktif pada jalur keluar maupun masuk suatu fasilitas. Selain digunakan di instalasi nuklir, RPM juga banyak diterapkan pada pelabuhan, bandar udara, serta pos pemeriksaan perbatasan untuk mencegah perpindahan material radioaktif secara ilegal. Menurut Vasiljević et al. [1], performa portal pengawas radiasi dipengaruhi oleh konfigurasi detektor, metode pengolahan sinyal, serta kemampuan sistem dalam menyajikan informasi secara cepat kepada operator.

Seiring berkembangnya konsep Internet of Things (IoT), sistem monitoring tidak lagi bergantung pada komunikasi berbasis kabel, tetapi mulai memanfaatkan komunikasi nirkabel yang lebih fleksibel. Salah satu perangkat yang banyak digunakan pada implementasi IoT adalah ESP32 karena telah mengintegrasikan prosesor dual-core, modul Wi-Fi, Bluetooth, serta berbagai antarmuka komunikasi dalam satu chip [2]. Karakteristik tersebut memungkinkan ESP32 digunakan sebagai node pada sistem kontrol terdistribusi yang mampu melakukan akuisisi data, komunikasi antarmode, serta pengendalian perangkat secara real-time tanpa memerlukan perangkat komputasi dengan spesifikasi tinggi.

Pada sistem kontrol terdistribusi, mekanisme komunikasi memiliki pengaruh yang besar terhadap kecepatan respons dan keandalan sistem. Salah satu protokol komunikasi yang dikembangkan oleh Espressif adalah ESP-NOW, yaitu protokol komunikasi peer-to-peer yang memungkinkan pertukaran data secara langsung antarperangkat ESP32 tanpa memerlukan access point maupun koneksi internet [3]. Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan oleh Urazayev et al. [4], ESP-NOW memiliki waktu tunda komunikasi yang rendah sehingga sesuai digunakan pada aplikasi monitoring real-time. Selain itu, penelitian Magzym et al. [5] menunjukkan bahwa mekanisme sinkronisasi pada ESP-NOW mampu meningkatkan efisiensi energi sekaligus menjaga stabilitas komunikasi pada sistem yang terdiri atas beberapa node.

Selain komunikasi data, antarmuka pengguna (*Human Machine Interface/HMI*) menjadi komponen penting dalam suatu sistem monitoring karena berperan dalam menyampaikan informasi kondisi perangkat kepada operator secara cepat dan mudah dipahami. Perkembangan teknologi HMI saat ini tidak hanya berfokus pada tampilan visual, tetapi juga pada aspek interaktivitas, kemudahan penggunaan, dan efisiensi pengolahan data [6]. Salah satu pustaka grafis yang banyak digunakan pada perangkat embedded adalah Light and Versatile Graphics Library (LVGL) [7]. Library ini menyediakan berbagai komponen antarmuka seperti tombol, indikator, grafik, hingga animasi yang ringan sehingga mampu dijalankan pada mikrokontroler dengan sumber daya terbatas. Dengan dukungan tersebut, LVGL memungkinkan pengembangan antarmuka monitoring yang lebih informatif tanpa memerlukan komputer sebagai media visualisasi utama.

Konsep Distributed Control System (DCS) telah banyak diterapkan pada berbagai bidang industri karena mampu meningkatkan fleksibilitas, kemudahan pemeliharaan, serta keandalan sistem dibandingkan arsitektur terpusat [8]. Pada sistem ini, setiap node memiliki tugas tertentu dan saling bertukar informasi melalui jaringan komunikasi sehingga proses monitoring maupun pengendalian dapat dilakukan secara bersamaan. Pendekatan tersebut sangat sesuai diterapkan pada portal pengawas radiasi yang terdiri atas beberapa sensor dan aktuator yang tersebar pada lokasi berbeda namun tetap membutuhkan sinkronisasi data secara real-time.

Berbagai penelitian sebelumnya telah membahas implementasi ESP-NOW sebagai media komunikasi nirkabel, pemanfaatan LVGL sebagai antarmuka grafis pada perangkat embedded, maupun pengembangan sistem monitoring berbasis ESP32 secara terpisah. Akan tetapi, penelitian yang mengintegrasikan ESP-NOW, LVGL, serta arsitektur kontrol terdistribusi pada sistem portal pengawas radiasi masih sangat terbatas. Sebagian besar penelitian hanya berfokus pada pengujian performa komunikasi, implementasi antarmuka pengguna, atau pengembangan perangkat monitoring secara umum tanpa mengintegrasikan ketiga aspek tersebut dalam satu sistem yang utuh.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini mengimplementasikan protokol komunikasi ESP-NOW pada sistem kontrol terdistribusi berbasis ESP32 serta mengembangkan antarmuka Human Machine Interface (HMI) menggunakan LVGL untuk mendukung proses monitoring dan pengendalian portal pengawas radiasi secara real-time. Sistem dirancang menggunakan satu ESP32 sebagai master yang bertugas mengelola komunikasi dan menampilkan informasi pada layar sentuh, sedangkan beberapa ESP32 lainnya berfungsi sebagai slave node yang mengendalikan sensor maupun aktuator. Integrasi tersebut diharapkan mampu menghasilkan sistem monitoring yang memiliki latensi komunikasi rendah, antarmuka yang informatif, serta fleksibilitas instalasi yang lebih baik dibandingkan sistem berbasis komunikasi kabel.

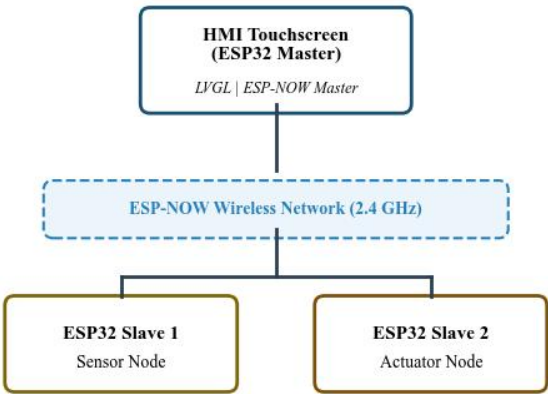
METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan metode Research and Development (R&D) dengan pendekatan implementatif untuk merancang dan merealisasikan sistem kontrol terdistribusi portal pengawas radiasi berbasis ESP32. Fokus

penelitian diarahkan pada implementasi protokol komunikasi nirkabel ESP-NOW sebagai media pertukaran data antar node serta penerapan Light and Versatile Graphics Library (LVGL) sebagai antarmuka pengguna (*Human Machine Interface* atau HMI). Pengembangan sistem dilakukan melalui tahapan analisis kebutuhan, perancangan sistem, implementasi perangkat keras dan perangkat lunak, integrasi sistem, serta pengujian terhadap prototype yang telah dibangun.

Perangkat utama yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas satu buah ESP32 Master yang terintegrasi dengan layar sentuh (*touchscreen*) sebagai HMI, dua buah ESP32 Slave yang berfungsi sebagai *sensor node* dan *actuator node*, modul relay, motor stepper, buzzer, sensor ultrasonik, sensor inframerah, limit switch, serta komponen pendukung lainnya. Pengembangan perangkat lunak dilakukan menggunakan Arduino IDE dengan memanfaatkan pustaka ESP-NOW sebagai media komunikasi nirkabel dan LVGL sebagai antarmuka grafis pada layar sentuh.

Arsitektur sistem yang dikembangkan menggunakan konsep distributed control system, yaitu satu ESP32 Master sebagai pusat pengendali dan dua ESP32 Slave sebagai node yang menangani fungsi akuisisi data sensor serta pengendalian aktuator. ESP32 Master bertugas mengelola komunikasi ESP-NOW, memproses data yang diterima dari setiap slave, serta menampilkan informasi sistem melalui antarmuka berbasis LVGL. Sebaliknya, setiap perintah yang diberikan pengguna melalui HMI akan dikirimkan menuju node tujuan menggunakan komunikasi ESP-NOW. Seluruh komunikasi dilakukan secara *peer-to-peer* pada frekuensi 2,4 GHz tanpa memerlukan access point maupun koneksi internet. Arsitektur sistem yang dikembangkan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Arsitektur Sistem Kontrol Terdistribusi Berbasis ESP32

Setelah seluruh perangkat keras dan perangkat lunak berhasil diintegrasikan, dilakukan pengujian sistem untuk memastikan seluruh fungsi berjalan sesuai dengan perancangan. Pengujian difokuskan pada implementasi komunikasi ESP-NOW, pengiriman dan penerimaan data antar node, pembaruan informasi pada antarmuka LVGL, pengendalian aktuator melalui HMI, monitoring sensor, sinkronisasi komunikasi antara master dan slave, serta pengukuran waktu respons sistem. Parameter pengujian yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Pengujian Sistem

No.	Fitur yang Diuji	Skenario Pengujian	Indikator Keberhasilan
1	Komunikasi ESP-NOW	Menghubungkan ESP32 Master dengan seluruh ESP32 Slave	Seluruh node berhasil terhubung tanpa kegagalan komunikasi
2	Pengiriman Data	Master mengirimkan perintah ke masing-masing slave melalui ESP-NOW	Slave menerima dan mengeksekusi perintah sesuai data yang dikirim
3	Penerimaan Data	Slave mengirimkan status sistem ke Master	Data berhasil diterima dan ditampilkan pada GUI
4	GUI LVGL	Memverifikasi pembaruan tampilan berdasarkan data yang diterima	Informasi pada GUI berubah secara <i>real-time</i> sesuai kondisi sistem
5	Kontrol Aktuator	Mengendalikan relay, motor stepper, dan buzzer melalui GUI	Aktuator merespons sesuai perintah pengguna

6	Monitoring Sensor	Slave mengirimkan hasil pembacaan sensor ke Master	Nilai sensor berhasil ditampilkan pada GUI
7	Sinkronisasi Master-Slave	Pertukaran data dilakukan secara berulang selama sistem berjalan	Seluruh node tetap tersinkronisasi tanpa kehilangan data

HASIL DAN PEMBAHASAN

Prototype sistem kontrol terdistribusi portal pengawas radiasi berhasil direalisasikan menggunakan tiga buah mikrokontroler ESP32 yang terdiri atas satu ESP32 Master dan dua ESP32 Slave. ESP32 Master berfungsi sebagai pusat pengendali sistem sekaligus menjalankan antarmuka pengguna berbasis Light and Versatile Graphics Library (LVGL), sedangkan kedua ESP32 Slave bertugas menangani pembacaan sensor lingkungan dan pengendalian aktuator portal. Seluruh node saling terhubung melalui protokol komunikasi nirkabel ESP-NOW, sehingga proses pertukaran data dapat dilakukan secara langsung tanpa memerlukan access point maupun router. Pendekatan ini menghasilkan sistem yang lebih sederhana, fleksibel, dan mudah dikembangkan sesuai kebutuhan.



Gambar 2. Prototype Sistem Kontrol Terdistribusi Portal Pengawas Radiasi

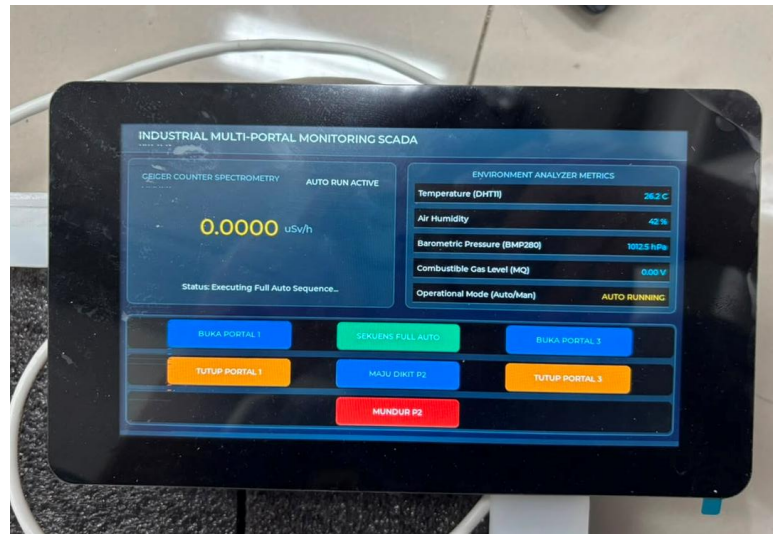
Berdasarkan implementasi yang ditunjukkan pada Gambar 2, prototype dibangun menggunakan rangka aluminium profile sebagai struktur mekanik utama yang mendukung pergerakan portal. Panel kontrol ditempatkan pada salah satu sisi portal dan berisi rangkaian ESP32, modul relay, catu daya, serta driver aktuator. Sementara itu, unit HMI dipasang pada bagian depan sistem sehingga memudahkan operator dalam melakukan proses monitoring maupun pengendalian. Tata letak tersebut dirancang untuk memisahkan fungsi kendali, akuisisi data, dan aktuator sehingga proses integrasi perangkat keras menjadi lebih terstruktur.

Arsitektur sistem menerapkan konsep distributed control system, yaitu pembagian fungsi pengendalian ke dalam beberapa node yang saling berkomunikasi melalui jaringan nirkabel. Pendekatan ini berbeda dengan sistem kontrol terpusat yang mengandalkan satu mikrokontroler untuk menjalankan seluruh proses. Dengan mendistribusikan tugas ke beberapa ESP32, beban pemrosesan menjadi lebih ringan, komunikasi antarperangkat menjadi lebih terorganisasi, serta pengembangan sistem dapat dilakukan dengan lebih mudah apabila jumlah sensor atau aktuator ditambah di masa mendatang. Konsep tersebut sejalan dengan penelitian Pang et al. [9] yang menyatakan bahwa sistem kontrol terdistribusi memberikan fleksibilitas, modularitas, dan skalabilitas yang lebih baik dibandingkan sistem kontrol terpusat.

Selain mendukung konsep kontrol terdistribusi, penggunaan ESP32 juga memberikan keuntungan berupa kemampuan pemrosesan yang tinggi serta dukungan komunikasi nirkabel yang terintegrasi dalam satu perangkat. Penelitian Hercog et al. [2] menunjukkan bahwa ESP32 merupakan platform embedded yang sesuai untuk aplikasi Internet of Things dan sistem monitoring karena memiliki performa yang baik dengan konsumsi daya yang relatif rendah. Pada penelitian ini, kemampuan tersebut dimanfaatkan untuk mengintegrasikan komunikasi ESP-NOW, pengolahan data sensor, dan visualisasi GUI secara bersamaan sehingga prototype mampu beroperasi secara mandiri tanpa memerlukan komputer eksternal.

Antarmuka pengguna pada penelitian ini dikembangkan menggunakan Light and Versatile Graphics Library (LVGL) yang berjalan pada ESP32 Master dengan layar sentuh sebagai media interaksi antara operator dan sistem. Penggunaan LVGL dipilih karena menyediakan komponen grafis yang lengkap, ringan, dan mampu berjalan pada perangkat embedded dengan sumber daya terbatas. Selain meningkatkan tampilan visual,

penggunaan GUI juga bertujuan untuk mempermudah proses monitoring kondisi sistem serta pengendalian portal dalam satu antarmuka yang terintegrasi.



Gambar 3. Tampilan GUI Berbasis LVGL

Berdasarkan Gambar 3, GUI dirancang untuk menampilkan berbagai informasi penting yang dibutuhkan operator selama proses pengoperasian sistem. Informasi tersebut meliputi nilai laju dosis radiasi, parameter lingkungan berupa temperatur, kelembapan, tekanan udara, dan konsentrasi gas, serta status operasional portal. Seluruh data diperbarui secara real-time berdasarkan informasi yang diterima dari ESP32 Slave melalui komunikasi ESP-NOW sehingga operator dapat memantau kondisi sistem secara langsung tanpa perlu mengakses perangkat lain.

Selain fungsi monitoring, GUI juga menyediakan berbagai fitur pengendalian yang meliputi tombol Open Portal, Close Portal, Manual Jog, Auto Sequence, serta Stop Scan. Ketika operator memilih salah satu menu tersebut, ESP32 Master akan mengirimkan paket data menuju node slave menggunakan protokol ESP-NOW untuk mengendalikan aktuatur sesuai perintah yang diberikan. Integrasi antara GUI dan komunikasi nirkabel memungkinkan proses monitoring dan kontrol dilakukan melalui satu perangkat HMI sehingga meningkatkan kemudahan pengoperasian sistem.

Implementasi GUI berbasis LVGL pada penelitian ini menunjukkan bahwa antarmuka grafis mampu meningkatkan efektivitas interaksi antara operator dan sistem kontrol. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Adhi et al. [6] yang menyatakan bahwa LVGL dapat menghasilkan antarmuka yang responsif, ringan, dan mudah dikembangkan pada platform ESP32. Selain itu, penelitian mengenai Human-Machine Interface juga menjelaskan bahwa penggunaan GUI modern mampu meningkatkan efisiensi monitoring, mempercepat proses pengambilan keputusan, serta mengurangi kemungkinan kesalahan operator dibandingkan penggunaan antarmuka konvensional berbasis tombol fisik atau tampilan karakter.

Komunikasi antar node pada sistem kontrol terdistribusi ini diimplementasikan menggunakan protokol ESP-NOW. Protokol tersebut memungkinkan pertukaran data secara langsung antar perangkat ESP32 tanpa memerlukan access point maupun router, sehingga konfigurasi jaringan menjadi lebih sederhana dan sesuai untuk aplikasi embedded yang membutuhkan komunikasi dengan latensi rendah. Pada penelitian ini, satu ESP32 berperan sebagai master yang bertugas mengirimkan perintah pengendalian serta menerima data dari dua ESP32 slave, sedangkan masing-masing slave bertanggung jawab terhadap proses pembacaan sensor dan pengendalian aktuatur.

Proses komunikasi dilakukan dengan mekanisme peer-to-peer melalui alamat MAC yang telah didaftarkan pada setiap node. Ketika operator memberikan perintah melalui GUI berbasis LVGL, ESP32 Master mengirimkan paket data menggunakan ESP-NOW menuju node slave yang sesuai. Selanjutnya, node slave memproses perintah tersebut dan mengirimkan informasi status maupun data sensor kembali ke master untuk ditampilkan pada antarmuka pengguna secara real-time.

```

slave3 | Arduino IDE 2.3.6
File Edit Sketch Tools Help

ESP32 Dev Module

slave3.ino
23 #define L2_REKANAN ..... 15
24 #define PIN_BUZZER ..... 33
25
26 //---- KONFIGURASI WAKTU TUNGGU ----
27 const unsigned long TIME_G1_OPEN = 15000;
28 const unsigned long TIME_G1_CLOSE = 15000;

Output Serial Monitor X
Message (Enter to send message to 'ESP32 Dev Module' on 'COM5')
New Line 115200 baud

[SLAVE3][t=26.7s][MANUAL] Menerima perintah dari MASTER: Membuka Portal 1 (G1).
[SLAVE3][t=49.6s][MANUAL] Menerima perintah dari MASTER: Menutup Portal 1 (G1).
[SLAVE3][t=80.2s][MANUAL] Menerima perintah dari MASTER: Menggerakkan motor MAJU.
[SLAVE3][t=80.2s][MANUAL] Menerima perintah dari MASTER: Menggerakkan motor MUNDUR.
[SLAVE3][t=100.1s][MANUAL] Menerima perintah dari MASTER: Membuka Portal 3 (G3).
[SLAVE3][t=117.4s][MANUAL] Menerima perintah dari MASTER: Menutup Portal 3 (G3).

-----
[SLAVE3][t=132.4s][AUTO] Menerima perintah dari MASTER: Mulai sekuen otomatis portal.
[SLAVE3][t=132.4s][AUTO] Langkah 1: Membuka Portal Depan (Portal 1 / G1).
[SLAVE3][t=147.4s][AUTO] Langkah 2: Menutup Portal Depan (Portal 1 / G1).
[SLAVE3][t=162.4s][AUTO] Langkah 3: Motor bergerak maju untuk proses scanning...
***** 3: Scanning selesai, motor kembali mundur...
[SLAVE3][t=232.4s][AUTO] Langkah 4: Area aman, membuka Portal Belakang (Portal 3 / G3).
***** 4: Menutup kembali Portal Belakang (Portal 3 / G3).
[SLAVE3][t=327.4s][AUTO] Sekuen otomatis selesai. Sistem kembali ke mode standby.
  
```

Gambar 4. Serial Monitor ESP-NOW (Slave 3)

Berdasarkan implementasi yang dilakukan, komunikasi ESP-NOW berhasil menghubungkan seluruh node sesuai dengan arsitektur sistem yang telah dirancang. Proses pengiriman dan penerimaan data berlangsung secara konsisten sehingga sinkronisasi antara proses monitoring dan pengendalian dapat berjalan dengan baik. Hasil tersebut menunjukkan bahwa ESP-NOW mampu mendukung komunikasi pada sistem kontrol terdistribusi dengan konfigurasi yang sederhana namun tetap memberikan performa yang memadai. Temuan ini sejalan dengan penelitian Pasic et al. [3] yang menjelaskan bahwa ESP-NOW menyediakan mekanisme komunikasi langsung antar perangkat ESP32 dengan latensi rendah dan konfigurasi yang sederhana. Selain itu, penelitian Urazayev et al. [4] juga menunjukkan bahwa ESP-NOW memiliki performa komunikasi yang stabil pada aplikasi monitoring dan kontrol berbasis embedded system.



Gambar 5. Prototipe saat menjalankan proses Auto Sequence

Berdasarkan Gambar 5, prototype berhasil menjalankan proses pengujian sesuai urutan kerja yang telah dirancang. Ketika operator menekan tombol *Auto Sequence* pada antarmuka HMI, ESP32 Master mengirimkan perintah melalui komunikasi ESP-NOW menuju ESP32 Slave. Selanjutnya, slave mengendalikan aktuator secara bertahap yang meliputi pembukaan Portal 1, proses scanning menggunakan motor stepper, hingga pembukaan Portal 3 setelah proses pemeriksaan selesai. Selama pengujian berlangsung, seluruh aktuator mampu merespons setiap perintah tanpa terjadi kegagalan komunikasi maupun kesalahan urutan operasi.

Tabel 2. Hasil Pengujian Fungsional Sistem

No.	Parameter Pengujian	Hasil	Keterangan
1	Inisialisasi ESP-NOW	Berhasil	Seluruh node berhasil terhubung
2	Pengiriman Data	Berhasil	Master berhasil mengirimkan data ke slave
3	Penerimaan Data	Berhasil	Slave berhasil menerima dan memproses data
4	Pembaruan GUI LVGL	Berhasil	Informasi sistem diperbarui secara real-time
5	Monitoring Sensor	Berhasil	Data sensor ditampilkan pada GUI
6	Pengendalian Aktuator	Berhasil	Portal merespons perintah operator
7	Sinkronisasi Master-Slave	Berhasil	Komunikasi antar node berjalan normal

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 2, seluruh fungsi utama sistem berhasil diimplementasikan sesuai dengan rancangan. Komunikasi menggunakan protokol ESP-NOW mampu mendukung pertukaran data antara ESP32 Master dan ESP32 Slave secara konsisten sehingga proses monitoring maupun pengendalian dapat dilakukan secara bersamaan. Selama pengujian, proses pengiriman dan penerimaan data berlangsung dengan baik tanpa memerlukan infrastruktur jaringan tambahan, sehingga sistem dapat beroperasi secara mandiri.

Implementasi GUI berbasis LVGL juga berhasil menampilkan informasi sensor dan status aktuator secara real-time sesuai dengan data yang diterima dari node slave. Selain itu, seluruh tombol pengendalian yang tersedia pada antarmuka pengguna mampu mengirimkan perintah kepada node slave sehingga aktuator portal dapat beroperasi sesuai dengan perintah operator. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi antara GUI LVGL dan komunikasi ESP-NOW mampu menghasilkan mekanisme monitoring dan kontrol yang berjalan secara sinkron.

Secara keseluruhan, hasil implementasi menunjukkan bahwa arsitektur sistem kontrol terdistribusi yang dikembangkan telah memenuhi tujuan penelitian, yaitu mengintegrasikan komunikasi nirkabel ESP-NOW dengan antarmuka grafis LVGL pada platform ESP32. Pendekatan tersebut memberikan sistem yang modular, mudah dikembangkan, serta sesuai diterapkan pada prototype portal pengawas radiasi berbasis embedded system.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil implementasi dan pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem kontrol terdistribusi portal pengawas radiasi berbasis ESP32 berhasil dikembangkan dengan mengintegrasikan protokol komunikasi nirkabel ESP-NOW dan antarmuka grafis berbasis LVGL. Arsitektur distributed control system yang diterapkan mampu membagi fungsi pengendalian ke beberapa node ESP32 sehingga komunikasi antara HMI dan perangkat aktuator dapat berlangsung secara nirkabel tanpa memerlukan jaringan Wi-Fi maupun router.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh fungsi sistem berjalan sesuai dengan rancangan. Perintah manual berupa pembukaan dan penutupan Portal 1, pembukaan dan penutupan Portal 3, serta pengendalian motor stepper dapat diterima oleh ESP32 Slave 3 melalui komunikasi ESP-NOW dan dieksekusi dengan baik. Selain itu, mode Auto Sequence mampu menjalankan rangkaian operasi secara berurutan mulai dari pembukaan Portal 1, proses scanning, hingga pembukaan dan penutupan Portal 3 tanpa terjadi kegagalan komunikasi selama pengujian.

Implementasi GUI menggunakan pustaka LVGL juga berhasil menyediakan antarmuka yang interaktif untuk proses monitoring dan pengendalian sistem. Informasi kondisi sistem, data sensor, serta tombol kendali dapat ditampilkan secara real-time sehingga memudahkan operator dalam mengoperasikan prototype. Dengan demikian, penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi ESP-NOW dan LVGL dapat diterapkan sebagai solusi komunikasi dan antarmuka pada sistem kontrol terdistribusi portal pengawas radiasi berbasis ESP32.

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat, karunia, dan penyertaan-Nya sehingga karya tulis ilmiah ini dapat diselesaikan dengan baik. Penulis menyadari bahwa penyusunan karya tulis ilmiah ini tidak terlepas dari bantuan, dukungan, serta bimbingan dari berbagai pihak.

Oleh karena itu, penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Budi Suhendro, S.ST.,M.Kom. selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu, memberikan arahan, masukan, serta bimbingan selama proses penelitian hingga penyusunan karya tulis ilmiah ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada kedua orang tua dan keluarga atas doa, dukungan, serta motivasi yang senantiasa diberikan. Selain itu, penulis menyampaikan apresiasi kepada seluruh dosen Program Studi Teknologi Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol, rekan-rekan mahasiswa, serta semua pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chaitanya, K., K. R. Rao, and J. R. Sastry, "A Framework for Testing Distributed Embedded Systems," *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, vol. 8, no. 4, pp. 1194-1227, Jul.-Aug. 2019.
- [2] Hercog, D., T. Lerher, M. Truntič, and O. Težak, "Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices," *Sensors*, vol. 23, no. 15, p. 6739, Jul. 2023.
- [3] Magzym, Y., A. Eduard, D. Urazayev, X. Fafoutis, and D. Zorbas, "Synchronized ESP-NOW for Improved Energy Efficiency," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence Systems*, 2023.
- [4] Pang, C., "Special Issue on 'Distributed and Networked Control Systems'," *Asian Journal of Control*, vol. 17, Jan. 2015.
- [5] Park, P., S. C. Ergen, C. Fischione, C. Lu, and K. H. Johansson, "Wireless Network Design for Control Systems: A Survey," *arXiv preprint arXiv:1708.07353*, Aug. 2017.
- [6] Pasic, R., I. Kuzmanov, and K. Atanasovski, "ESP-NOW communication protocol with ESP32," *Journal of Universal Excellence*, vol. 6, no. 1, pp. 53-60, Feb. 2021.
- [7] Safriadi, D. N. A. P., "Implementation of LVGL and LovyanGFX into a Portable Datalogger Embedded System," *Journal of Computation Physics and Earth Science (JOC PES)*, vol. 4, no. 2, pp. 62-68, Oct. 2024.
- [8] Urazayev, D. and A. Eduard, "Indoor Performance Evaluation of ESP-NOW," in *Proceedings of the 2023 IEEE Smart Information Systems and Technologies (SIST)*, Astana, Kazakhstan, May 2023, pp. 1-6.
- [9] Vasiljević, J. and B. Cederwall, "Performance Evaluation of an Imaging Radiation Portal Monitor System," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 17, p. 9001, Sep. 2022.
- [10] Zhou, Y., "Design and Realization of Monitoring and Control System for Smart Farms using ESP32-P4 and LVGL," *Journal of Computer Science and Electrical Engineering*, vol. 8, no. 4, pp. 29-36, 2026.