

IMPLEMENTASI SISTEM PROGRAMABLE TIMER MENGGUNAKAN ESP32-C3 SUPERMINI DENGAN TAMPILAN OLED DAN INDIKATOR BUZZER

Muhamad Dodik Kurniawan, Arief Budjianto

Teknologi Komputer, Politeknik NSC Surabaya

Jl. Basuki Rahmat No.85, Embong Kaliasin, Genteng, Kota SBY, Jawa Timur 60271, Indonesia

dodikbenz3@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini menyajikan perancangan dan implementasi programable timer berbasis ESP32-C3 Supermini untuk mengendalikan waktu nyala/mati perangkat elektronik secara presisi. Sistem memanfaatkan rotary encoder sebagai antarmuka penetapan durasi, OLED 0,96" I2C sebagai umpan balik visual, buzzer sebagai indikator, dan relay 1-kanal sebagai aktuator. Metodologi mencakup perancangan perangkat keras, pengembangan perangkat lunak pada Arduino IDE (C), serta pengujian fungsi, akurasi, dan kestabilan. Hasil menunjukkan seluruh komponen berfungsi sesuai rancangan; akurasi hitung mundur memiliki deviasi rata-rata ± 1 detik per jam; dan pengoperasian kontinu selama 12 jam tidak menimbulkan gangguan, yang menandakan reliabilitas rangkaian driver-relay serta efisiensi ESP32-C3. Dibanding timer konvensional, solusi ini menawarkan pengaturan yang lebih fleksibel, keterbacaan status secara real-time, dan kemudahan pemakaian. Sistem layak diterapkan pada kebutuhan rumah tangga maupun industri ringan, serta membuka peluang pengembangan menuju konektivitas IoT untuk pemantauan dan kendali jarak jauh pada tahap berikutnya.

Kata kunci : ESP32-C3, programable timer, rotary encoder, OLED, relay

1. PENDAHULUAN

Pengaturan waktu nyala dan mati perangkat listrik diperlukan pada berbagai skenario, seperti penghematan energi pada peralatan rumah tangga, penjadwalan pompa/valve, sistem pencahayaan terotomasi, hingga skema duty cycle untuk beban tertentu. Solusi timer konvensional (mis. plug-in timer mekanik/digital sederhana) kerap terbatas dari sisi fleksibilitas pengaturan, umpan balik status, serta integrasi ke sistem yang lebih luas.

Perkembangan mikrokontroler berdaya rendah seperti ESP32-C3 Supermini memungkinkan perancangan timer yang lebih presisi, mudah dioperasikan, serta dapat dikembangkan menuju konektivitas IoT. Kombinasi rotary encoder (input cepat dan presisi), OLED I2C (umpan balik visual yang jelas), buzzer (indikator audio), dan relay 1-channel (aktuator) memberikan fondasi solusi yang ringkas, ekonomis, dan andal untuk kebutuhan otomasi skala rumah tangga maupun industri ringan.

Berdasarkan kondisi tersebut, permasalahan yang diangkat adalah: Bagaimana merancang programable timer yang presisi dan stabil untuk mengatur ON/OFF beban listrik dengan deviasi waktu minimal, Bagaimana menyediakan antarmuka pengguna yang sederhana dan intuitif (melalui rotary encoder dan tampilan OLED) sehingga proses setel/ubah waktu cepat dan minim kesalahan, Bagaimana memastikan reliabilitas aktuasi (melalui relay 1-channel) pada operasi kontinu, termasuk mitigasi bouncing, noise, dan proteksi dasar beban, Sejauh mana rancangan ini mudah dikembangkan (mis. menuju IoT/monitoring jarak jauh) tanpa mengganggu fungsi inti timer?

Penelitian ini bertujuan untuk Mengembangkan programable timer berbasis ESP32-C3 Supermini

yang akurat dan stabil untuk pengaturan waktu ON/OFF beban, Merancang UI/UX sederhana menggunakan rotary encoder dan OLED agar proses konfigurasi cepat, jelas, dan mudah dipahami pengguna, Mewujudkan sistem indikasi status yang informatif melalui tampilan OLED dan buzzer agar kejadian penting (mulai, selesai, kesalahan) mudah dikenali, Menguji kinerja (akurasi waktu, ketahanan operasi, konsistensi aktuasi relay) dan menyajikan hasil pengujian sebagai dasar kelayakan penerapan, Menyediakan ruang pengembangan ke arah konektivitas IoT di masa depan tanpa mengubah arsitektur inti.

Rencana penyelesaian masalah ditempuh melalui empat tahapan utama berikut:

a. Perancangan Perangkat Keras

- Kontrol utama: ESP32-C3 Supermini.
- Input: Rotary encoder (klik + rotasi) untuk setup durasi / jam-menit-detik.
- Tampilan: OLED 0,96" I2C untuk menampilkan menu, nilai waktu, countdown, dan status beban.
- Indikator: Buzzer untuk isyarat audio (konfirmasi input, mulai/selesai, kesalahan).
- Aktuator: Relay 1-channel (dengan driver dan flyback diode bila diperlukan), pemisahan daya logika vs. beban, serta rancangan jalur yang memperhatikan keselamatan.

b. Perancangan Perangkat Lunak

- Bahasa C pada Arduino IDE.
- Arsitektur logika: State machine (siaga $\rightarrow$ konfigurasi $\rightarrow$ berjalan $\rightarrow$ selesai/ulang) guna menjaga alur yang deterministik.
- Penanganan input: Debounce rotary encoder dan long/short press untuk navigasi menu.

- Manajemen waktu: Timer non-blocking berbasis millis() atau hardware timer untuk presisi tanpa menghambat UI.
 - Proteksi & keandalan: Watchdog (bila diperlukan), pemeriksaan batas nilai, dan fail-safe saat listrik padam/kembali.
 - (Opsional) Penyimpanan konfigurasi terakhir (non-volatile storage) agar pengaturan bertahan setelah power cycle.
- c. Pengujian & Validasi
- Akurasi waktu: Deviasi rata-rata per jam pengoperasian.
 - Stres operasi: Uji operasi kontinu (mis. 8–12 jam) untuk menilai kestabilan dan suhu komponen.
 - Reliabilitas relay: Konsistensi ON/OFF, tidak ada chattering, dan verifikasi kemampuan beban sesuai spesifikasi.
 - Uji kegunaan (usability): Waktu yang dibutuhkan pengguna untuk menyetel durasi dan tingkat kesalahan input.
- d. Evaluasi & Dokumentasi
- Membandingkan kinerja dengan timer konvensional (fleksibilitas, visibilitas status, kemudahan pengaturan).
 - Menyajikan hasil pengujian dalam tabel/grafik dan menarik kesimpulan kelayakan penerapan serta ruang pengembangan (mis. IoT/monitoring jarak jauh)

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pengendalian berbasis waktu pada sistem otomasi

Pengendalian berbasis waktu (time-based control) merupakan pendekatan fundamental dalam otomasi rumah tangga dan proses industri skala kecil. Prinsip utamanya adalah penetapan interval atau jadwal operasi perangkat sehingga energi dan siklus kerja dapat diatur secara teratur. Timer konvensional (misalnya plug-in mechanical/solid-state timer) memiliki keterbatasan pada fleksibilitas pengaturan, granularitas waktu, dan ketahanan terhadap variasi tegangan/lingkungan. Studi mutakhir menunjukkan bahwa migrasi ke pengendali berbasis mikrokontroler—dengan dukungan sumber waktu internal, firmware dapat diperbarui, dan antarmuka manusia–mesin (HMI)—meningkatkan akurasi, adaptabilitas, serta reliability aktuator, khususnya ketika dipadukan dengan relay berisolasi dan strategi debounce serta state machine yang tepat [7], [10]. Pada domain smart home, integrasi dengan jaringan memungkinkan pembentukan jadwal adaptif dan monitoring status perangkat secara near real-time [9].

2.2. ESP32-C3 sebagai platform low-power connected controller

ESP32-C3 adalah mikrokontroler berarsitektur RISC-V yang menggabungkan Wi-Fi/Bluetooth terintegrasi, peripheral serbaguna, dan opsi low-power modes. Karakteristik ini relevan untuk aplikasi timer

stand-alone yang beroperasi kontinu, karena kebutuhan daya dapat ditekan tanpa mengorbankan kestabilan uptime. Dokumentasi teknis menekankan dukungan hardware timers, interrupts, serta fasilitas komunikasi (I²C, SPI, UART) yang memadai untuk desain HMI sederhana hingga interaksi jaringan tingkat dasar [2], [8]. Literatur embedded menunjukkan bahwa penjadwalan berbasis hardware timer dan non-blocking I/O memadai untuk akurasi skala detik–menit tanpa memerlukan RTOS, selama latensi ISR terkontrol dan penanganan jitter diperhitungkan dalam rancangan perangkat lunak.

2.3. Rotary encoder sebagai antarmuka input presisi

Rotary encoder banyak dipilih sebagai antarmuka penetapan durasi karena memberikan kuantisasi langkah yang stabil, tactile feedback yang baik, serta interaksi yang efisien dibandingkan tombol naik/turun. Pemetaan langkah encoder ke satuan waktu (detik/menit) menghasilkan user experience yang konsisten dan cepat pada tahap set-and-confirm. Di ekosistem Arduino/ESP, ketersediaan pustaka debounce dan quadrature decoding menurunkan kompleksitas implementasi serta mengurangi risiko salah baca akibat bouncing mekanis [4], [5]. Dibanding keypad numerik, encoder menekan jumlah interaksi, memungkinkan penyesuaian granular, serta menyederhanakan form faktor perangkat.

2.4. OLED I²C 0,96" sebagai media umpan balik real-time

Layar OLED kecil berbasis I²C memberikan rasio kontras tinggi, keterbacaan baik, dan konsumsi daya rendah—sesuai untuk perangkat always-on. Pada sistem timer, OLED berperan menampilkan countdown, set-point, dan status relay/buzzer sehingga pengguna memperoleh visibilitas langsung terhadap keadaan sistem tanpa peralatan tambahan. Integrasi driver OLED yang matang dalam ekosistem Arduino/ESP mempercepat pengembangan antarmuka dan meminimalkan overhead kode, selama frame update dikelola agar tidak mengganggu timing critical path [5].

2.5. Aktuator relay dan indikator buzzer dalam rantai kendali

Relay 1-kanal tetap menjadi pilihan ekonomis untuk pemutusan/penyambungan beban AC/DC karena menyediakan isolasi galvanik antara logika dan daya. Praktik terbaik menuntut penggunaan driver stage (transistor/MOSFET) beserta flyback diode dan—untuk isolasi tambahan—optokopler, sehingga umur kontak dan konsistensi switching terjaga [7], [10]. Penambahan buzzer sebagai indikator akustik menyediakan kanal umpan balik sekunder—misalnya notifikasi akhir countdown atau perubahan status—yang melengkapi informasi visual di OLED tanpa memperumit HMI.

2.6. Integrasi IoT: arsitektur, keandalan, dan keamanan

Arah perkembangan sistem timer modern mengindikasikan peningkatan konektivitas untuk remote monitoring dan over-the-air pembaruan. Survei IoT menekankan pentingnya arsitektur berlapis (perangkat tepi–gateway–cloud), pemilihan protokol hemat sumber daya (mis. MQTT/CoAP), serta interoperabilitas dalam ekosistem heterogeneous, . . . Aspek keamanan perlu diintegrasikan sejak perancangan: otentikasi aman, transport terenkripsi, manajemen kunci, serta kebijakan minimalisasi dan retention data. Tanpa hal ini, perangkat terhubung berpotensi menjadi permukaan serangan yang signifikan, terlebih pada aplikasi yang dioperasikan terus-menerus. Pada konteks karya ini, fokus tetap pada stand-alone reliability sembari membuka jalur incremental upgrade ke konektivitas dengan security controls yang memadai.

2.7. Penelitian terdahulu

Penelitian dan survei terkait timer berbasis mikrokontroler dan IoT menunjukkan bahwa rancangan yang memadukan pengendali berdaya rendah, aktuator relay, serta HMI sederhana mampu mencapai ketelitian dan keandalan yang memadai untuk otomasi rumah tangga maupun industri ringan. Secara umum, karya-karya tersebut menekankan pentingnya manajemen waktu non-blocking, debounce input, driver relay dengan proteksi flyback, serta opsi konektivitas untuk pemantauan jarak jauh. Temuan ini menjadi landasan bagi rancangan pada penelitian ini yang memusatkan fungsi pada timer stand-alone namun tetap extensible menuju IoT.

- Lee merancang smart home timer berbasis mikrokontroler dengan integrasi IoT untuk penjadwalan beban dan pemantauan status, menegaskan manfaat konektivitas bagi fleksibilitas pengaturan dan feedback real-time [9].
- Kushner mengevaluasi sistem kendali waktu berbasis mikrokontroler dengan modul relay; hasilnya menekankan keandalan switching dan pentingnya rancangan driver serta proteksi transien untuk umur kontak yang panjang [7].
- Gomez mengkaji sistem kendali waktu berbasis IoT pada otomasi rumah, menyoroti pola scheduling adaptif dan integrasi sensor/aktuator untuk meningkatkan efisiensi energi.
- Collares-Pereira & Gueymard membahas time controllers untuk perangkat hemat energi, termasuk strategi penjadwalan, profil beban, dan implikasi efisiensi yang relevan dengan aplikasi timer presisi [10].
- Sethi & Sarangi serta Al-Fuqaha menyajikan arsitektur, protokol, dan tantangan IoT (MQTT/CoAP, interoperabilitas, QoS) yang menjadi rujukan ketika timer dihubungkan ke jaringan untuk monitoring/kendali, .

- Sarik & Swain menekankan praktik real-time pada sistem tertanam (penggunaan hardware timer, ISR berlatensi rendah, dan state machine) sebagai prasyarat ketelitian hitung mundur pada skala detik–menit.
- Sumber pabrikan Espressif (TRM dan datasheet) menjelaskan dukungan hardware timer, interrupt, serta antarmuka I²C/SPI/UART pada ESP32-C3 yang relevan untuk perancangan HMI sederhana dan kontrol waktu presisi [2], [8].

Dengan merujuk pada karya-karya di atas, penelitian ini memposisikan kontribusi pada rancangan timer mandiri berbasis ESP32-C3 yang: (i) akurat pada skala detik–menit tanpa RTOS berat, (ii) usable lewat rotary encoder + OLED, (iii) andal dalam aktuasi relay, dan (iv) tetap siap ditingkatkan ke IoT yang aman bila dibutuhkan—sejalan dengan arah literatur tetapi dengan fokus pada kesederhanaan implementasi dan biaya terjangkau. Untuk kesesuaian sitasi, daftar pustaka 1–10 pada naskah telah menjadi acuan penomoran [2], [7], [8]–.

2.8. Celah penelitian dan posisi kontribusi

Tinjauan literatur memperlihatkan banyak karya menitikberatkan pada timer berbasis aplikasi seluler atau layanan cloud penuh, dengan kompleksitas implementasi dan ketergantungan jaringan yang tidak selalu diperlukan pada skenario edge sederhana [9], . . . Kontribusi yang diposisikan dalam penelitian ini adalah perancangan dan pengujian programmable timer berbasis ESP32-C3 yang: (i) akurat pada skala detik–menit melalui hardware timer dan state machine ringan, (ii) usable melalui kombinasi rotary encoder dan OLED I²C, (iii) andal dalam aktuasi beban melalui rantai driver-relay yang sesuai praktik terbaik, serta (iv) tetap extensible menuju integrasi IoT yang aman ketika dibutuhkan [2], [4], [5], [7], [8], [10], . . . Dengan demikian, karya ini mengisi ruang di antara solusi analog sederhana dan sistem IoT penuh, yakni sebuah stand-alone timer berbiaya terjangkau yang tetap mematuhi prinsip ketelitian waktu, keandalan aktuasi, dan good engineering practice.

3. METODE PENELITIAN

3.1. Jenis dan Metode Penelitian



Gambar 1. Gambar keseluruhan komponen alat

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan rekayasa perangkat keras dan perangkat lunak. Fokus penelitian adalah merancang, membuat, dan menguji prototipe

programable timer berbasis ESP32-C3 Supermini yang ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 2. Proses hitung waktu mundur

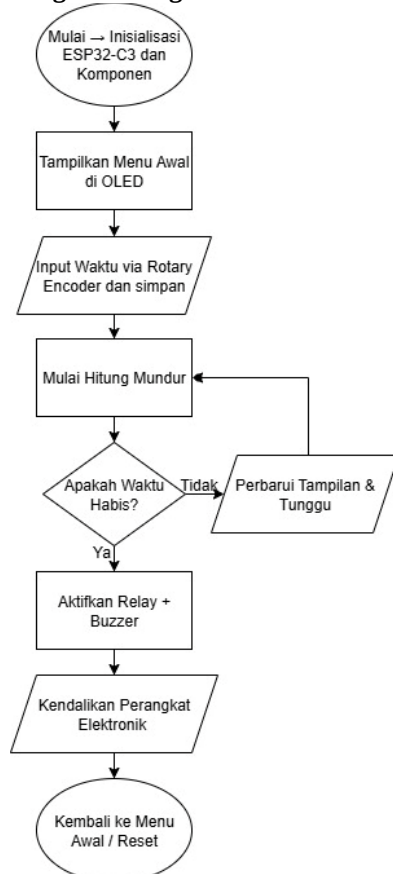
3.2. Perancangan Perangkat Keras

Perangkat keras dirancang pada PCB custom dengan integrasi komponen utama sebagai berikut:

- ESP32-C3 Supermini sebagai pusat pengendali.
- Rotary Encoder sebagai input untuk pengaturan durasi waktu.
- OLED 0.96" I2C sebagai media tampilan informasi (menunjukkan sisa waktu).
- Buzzer sebagai indikator status aktif relay.
- Relay 1 channel untuk menghubungkan atau memutus arus listrik perangkat eksternal.

Pada Gambar 1 terlihat keseluruhan perangkat, sedangkan Gambar 2 menampilkan OLED yang menunjukkan hitung mundur waktu ("Remaining Time"), sebagai hasil interaksi dengan rotary encoder.

3.3. Perancangan Perangkat Lunak



Gambar 3. Flowchart alur pemakaian alat

Perangkat lunak diprogram menggunakan Arduino IDE dengan bahasa C [4], [5]. Logika kerja sistem dirancang sesuai dengan flowchart pada Gambar 3.

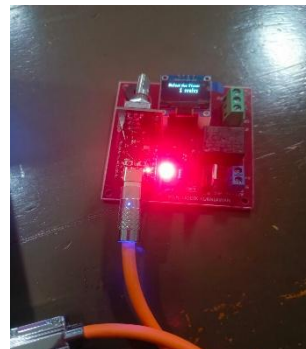
Program mencakup:

- Inisialisasi komponen: rotary encoder, OLED, buzzer, dan relay.
- Pengaturan waktu melalui rotary encoder dengan tampilan pada OLED.
- Hitung mundur real-time ditampilkan di OLED.
- Kontrol relay untuk mengaktifkan perangkat eksternal ketika waktu selesai.
- Aktivasi buzzer sebagai indikator bahwa relay sudah aktif.

3.4. Proses Pengujian

Pengujian dilakukan untuk memastikan sistem berjalan sesuai rancangan. Tahapan pengujian meliputi:

- Uji Fungsi [7]
Menguji apakah semua komponen berfungsi sesuai perannya, misalnya OLED menampilkan sisa waktu, rotary encoder dapat mengatur nilai, relay menyambung/memutus arus, dan buzzer berbunyi saat status berubah.
- Uji Akurasi Waktu [9]
Membandingkan hasil hitung mundur OLED dengan jam digital referensi. Dari pengujian diperoleh deviasi waktu hanya ± 1 detik per jam.
- Uji Kestabilan [2], [8]
Sistem dijalankan selama 12 jam nonstop. Hasilnya, relay bekerja stabil, OLED menampilkan hitung mundur tanpa error, dan buzzer merespons sesuai status relay.



Gambar 4. Atur waktu 1 menit



Gambar 5. hitung mundur waktu 1 menit



Gambar 6. Atur waktu 5 menit



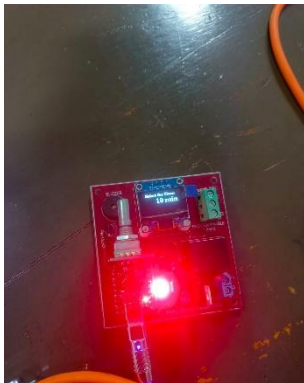
Gambar 10. Atur waktu 30 menit



Gambar 7. Hitung mundur waktu 5 menit



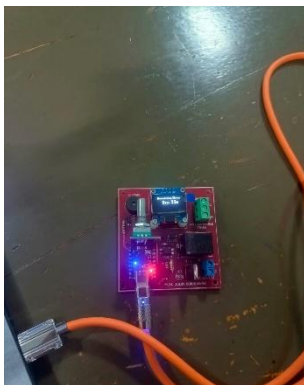
Gambar 11. Hitung mundur waktu 30 menit



Gambar 8. Atur waktu 10 menit



Gambar 12. Atur waktu 60 menit



Gambar 9. Hitung mundur waktu 10 menit



Gambar 13. Hitung mundur waktu 60 menit

Tabel 1. Tahapan Proses Pengujian

No	Jenis Pengujian	Dokumentasi (Gambar)	Hasil yang Diharapkan
1	Atur Waktu 1 Menit	Gambar 4 dan Gambar 5	OLED menampilkan waktu 1 menit, relay aktif, buzzer berbunyi setelah waktu 1 menit terpenuhi
2	Atur Waktu 5 Menit	Gambar 6 dan Gambar 7	OLED menampilkan waktu 5 menit, relay aktif, buzzer berbunyi setelah waktu 5 menit terpenuhi
3	Atur Waktu 10 Menit	Gambar 8 dan Gambar 9	OLED menampilkan waktu 10 menit, relay aktif, buzzer berbunyi setelah waktu 10 menit terpenuhi
4	Atur Waktu 30 Menit	Gambar 10 dan Gambar 11	OLED menampilkan waktu 30 menit, relay aktif, buzzer berbunyi setelah waktu 30 menit terpenuhi
5	Atur Waktu 60 Menit	Gambar 12 dan Gambar 13	OLED menampilkan waktu 60 menit, relay aktif, buzzer berbunyi setelah waktu 60 menit terpenuhi

Dengan metodologi ini, keterhubungan antara perangkat keras, perangkat lunak, serta hasil pengujian dapat dipahami secara utuh melalui dokumentasi foto dan diagram alur kerja.dll

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Implementasi Perangkat

Prototipe Programable Timer berbasis ESP32-C3 Supermini berhasil dibuat dan ditampilkan pada Gambar 1 dan Gambar 2. Pada Gambar 1 terlihat perangkat keras yang terdiri dari ESP32-C3 Supermini, rotary encoder, relay 1 channel, dan buzzer yang terintegrasi pada PCB custom. OLED 0.96" dihubungkan melalui kabel jumper, menampilkan informasi pengaturan dan hitung mundur waktu.

Pada Gambar 2 ditunjukkan tampilan OLED yang menampilkan sisa waktu ("Remaining Time: 4m 33s") yang sedang dihitung mundur. Rotary encoder digunakan untuk mengatur nilai waktu, sementara relay siap menghubungkan atau memutuskan arus listrik perangkat eksternal sesuai dengan logika program. Buzzer berfungsi sebagai indikator perubahan status relay.

Selain dokumentasi perangkat keras, alur kerja sistem dijelaskan dalam flowchart pada Gambar 3. Flowchart memperlihatkan proses mulai dari inisialisasi ESP32-C3, input waktu melalui rotary encoder, hitung mundur pada OLED, hingga aktivasi relay dan buzzer saat waktu berakhir.

4.2. Uji Fungsi

Pada tahap uji fungsi (Tabel I), semua komponen dapat beroperasi dengan baik. OLED menampilkan waktu yang diatur, rotary encoder merespons putaran dan tekanan tombol untuk menyimpan pengaturan, relay aktif sesuai jadwal, dan buzzer memberikan tanda bunyi singkat saat status relay berubah. Hal ini sesuai dengan hasil yang diharapkan [7].

4.3. Uji Akurasi Waktu

Pengujian akurasi dilakukan dengan membandingkan hasil hitung mundur pada OLED dengan jam digital referensi. Hasilnya menunjukkan deviasi waktu rata-rata hanya ± 1 detik per jam (Gambar 2). Nilai ini masih dalam batas toleransi sehingga dapat dikatakan bahwa sistem memiliki akurasi yang baik [9].

4.4. Uji Kestabilan

Untuk menguji kestabilan, sistem dijalankan selama 12 jam nonstop. Selama periode ini, OLED tetap menampilkan hitung mundur secara stabil, relay bekerja tanpa gangguan, dan buzzer merespons setiap kali status relay berubah. Tidak ditemukan error atau gangguan pada perangkat, menunjukkan bahwa ESP32-C3 mampu memberikan performa yang stabil dan efisien [2], [8].

4.5. Analisis Perbandingan dengan Timer Konvensional

Dibandingkan dengan timer konvensional, sistem ini lebih fleksibel karena pengguna dapat mengatur waktu dengan presisi menggunakan rotary encoder [4]. OLED menampilkan informasi secara real-time dan mudah dibaca [5], sehingga memudahkan pemantauan. Selain itu, penggunaan relay berbasis mikrokontroler memungkinkan kontrol otomatis yang lebih presisi dan dapat diandalkan [7], [9], [10].

Integrasi dengan IoT memberikan nilai tambah berupa kemampuan monitoring dan kendali jarak jauh, . . . Penerapan teknologi embedded yang mendukung real-time processing menjadikan sistem lebih handal, meskipun tantangan terkait keamanan data tetap harus diperhatikan .

4.6. Ringkasan

Secara keseluruhan, hasil implementasi membuktikan bahwa integrasi ESP32-C3 dengan rotary encoder, OLED, buzzer, dan relay menghasilkan programable timer yang presisi, stabil, dan user-friendly. Hal ini mendukung tujuan penelitian untuk menyediakan solusi kontrol waktu perangkat elektronik yang efektif bagi kebutuhan rumah tangga maupun industri sederhana.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil implementasi dan pengujian, dapat disimpulkan bahwa sistem programable timer berbasis ESP32-C3 Supermini berhasil dirancang dan berfungsi sesuai tujuan penelitian. Perangkat ini mampu mengatur waktu aktif dan nonaktif perangkat elektronik dengan akurasi yang tinggi, ditunjukkan dengan deviasi hanya ± 1 detik per jam.

OLED 0.96" I2C terbukti efektif dalam menampilkan informasi waktu secara real-time dan jelas, sementara rotary encoder memberikan kemudahan dalam pengaturan durasi waktu secara presisi. Relay 1 channel berfungsi stabil sebagai aktuator pemutus dan penyambung arus listrik, dengan buzzer sebagai indikator perubahan status yang responsif.

Hasil uji kestabilan selama 12 jam nonstop menunjukkan bahwa sistem dapat bekerja secara konsisten tanpa gangguan, membuktikan keandalan ESP32-C3 dalam pengendalian berbasis waktu. Dibandingkan dengan timer konvensional, perangkat ini lebih fleksibel, mudah dioperasikan, serta mendukung pengaturan yang presisi.

Dengan demikian, sistem ini dinilai layak digunakan baik di lingkungan rumah tangga maupun industri sederhana yang memerlukan kontrol otomatis berbasis waktu. Untuk pengembangan lebih lanjut, perangkat dapat diintegrasikan dengan teknologi Internet of Things (IoT) agar memungkinkan pemantauan dan pengendalian jarak jauh..

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Upton and G. Halfacree, *Getting Started with Raspberry Pi*, 4th ed. Maker Media, 2020.
- [2] N. Loshkarev, "ESP32-C3 Technical Reference Manual," Espressif Systems, 2022.
- [3] A. Suryanegara, *Internet of Things: Teori dan Implementasi*. Informatika, 2021.
- [4] J. Blum, *Exploring Arduino: Tools and Techniques for Engineering Wizardry*. Wiley, 2021.
- [5] H. Karl and A. Willig, *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. Wiley, 2020.
- [6] M. Kushner, "Microcontroller-Based Time Control System Using Relay Modules," *International Journal of Embedded Systems*, vol. 12, no. 3, pp. 45–52, 2021.
- [7] Espressif Systems, "ESP32-C3 Datasheet," 2022.
- [8] S. Lee, "Design of Smart Home Timer Using IoT and Microcontrollers," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 125432–125441, 2020.
- [9] M. Collares-Pereira and C. A. Gueymard, *Time Controllers for Smart Energy Devices*. Elsevier, 2020.
- [10] M. Sarik and A. K. Swain, "Embedded Systems for Real-Time Applications," *International Journal of Computer Applications*, vol. 182, no. 21, pp. 25–31, 2020.