

RANCANG BANGUN KOTAK AMAL CERDAS MENGUNAKAN ESP32 DENGAN INTEGRASI SISTEM NOTIFIKASI AUDIO BERBASIS EPS-NOW

Sherlen Nanda Arfiyanti¹, Aris Budiman²

^{1,2}Universitas Muhammadiyah Surakarta, Jl. A. Yani Tromol Pos 1 Pabelan, Kartasura,
Sukoharjo 57102, Indonesia

Email korespondensi: sherlennandaarfiyantia@gmail.com

Abstrak. Kotak amal konvensional kerap kali menghadapi permasalahan seperti kerentanan terhadap pencurian dan minimnya transparansi dalam pengelolaan dana. Untuk menjawab tantangan tersebut, penelitian ini merancang dan membangun sebuah kotak amal cerdas berbasis mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan sistem keamanan dan notifikasi audio *real-time*. Sistem ini dilengkapi dengan *keypad* 4x4 sebagai autentikasi, kunci solenoid sebagai pengaman fisik, sensor ultrasonik HC-SR04 untuk mendeteksi ketinggian kotak diambil, serta modul *DFPlayer* Mini yang mengeluarkan suara peringatan saat kotak dipindahkan tanpa otorisasi. Komunikasi antarperangkat dilakukan melalui protokol nirkabel ESP-NOW, memungkinkan notifikasi dikirim secara cepat dan efisien tanpa koneksi internet. Metode yang digunakan mencakup perancangan sistem secara menyeluruh, integrasi perangkat keras dengan ESP32, pengembangan perangkat lunak menggunakan Arduino IDE, serta serangkaian uji fungsi dan performa sistem. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa kotak amal cerdas yang dikembangkan mampu memberikan respon cepat terhadap potensi ancaman, meningkatkan keamanan, dan mendukung transparansi dalam kegiatan donasi. Dengan demikian, sistem ini diharapkan dapat menjadi solusi inovatif dalam manajemen dana sosial berbasis teknologi.

Kata kunci: ESP-NOW, ESP32, Keamanan, Kotak Amal, Notifikasi, Real-time.

PENDAHULUAN

Kotak amal merupakan media yang biasa digunakan untuk mengumpulkan sumbangan di tempat-tempat seperti tempat ibadah, organisasi sosial dan tempat umum lainnya. Namun banyak kotak amal konvensional yang masih memiliki kelemahan dalam hal



keamanan dan pengawasan sehingga berisiko dicuri. Sebagaimana terjadi di Kompleks Kuburan Desa Wonokerto, Ngawi, pada 26 Maret 2025, dimana kotak amal dicuri tanpa sepengetahuan pengelola (Alawi & Rastika, 2025). Kasus serupa juga terjadi di Kota Malang, ketika seorang residivis berinisial DK mencuri kotak amal di Masjid Miftahul Jannah dan melakukan aksi di beberapa lokasi pada awal Februari 2025 (Perdana & Gonsaga, 2025). Diperlukan sebuah sistem yang dapat memudahkan pengurus masjid dalam memantau kotak amal, serta meningkatkan keamanan dari risiko pencurian (Muhhana, 2024).

Kasus pencurian kotak amal tanpa sepengetahuan pengelola masih sering terjadi, menuntut adanya solusi teknologi yang dapat meningkatkan tingkat kewaspadaan dan keterlibatan pengelola dalam pengawasan (Suriana et al., 2022). Teknologi mikrokontroler, khususnya ESP32, menawarkan potensi signifikan dalam mengatasi masalah tersebut karena kemampuan komunikasi nirkabel, konsumsi daya rendah, dan kemudahan integrasi dengan berbagai sensor (Noerifanza, 2022).

Beberapa penelitian terdahulu telah mencoba meningkatkan keamanan kotak amal dengan teknologi sederhana. Salah satunya penelitian yang mengembangkan sistem keamanan kotak menggunakan sensor sidik jari dan notifikasi SMS via modul SIM800L. Meskipun solusi ini memberikan autentikasi biometrik dan notifikasi jarak jauh, sistem tersebut tidak mampu memberikan respons audio langsung saat kotak dipindahkan (Pratama & Pramudya, 2023).

Berdasarkan temuan tersebut, penelitian ini berupaya mengembangkan sistem kotak amal cerdas berbasis mikrokontroler ESP32 dengan sistem autentikasi menggunakan *keypad* 4x4 dan penguncian otomatis melalui solenoid *door lock* (Mindasari et al., 2022). Sistem ini dirancang agar hanya dapat diakses oleh pihak yang memiliki *Personal Identification Number* (PIN) yang telah ditentukan, sehingga menambah lapisan keamanan terhadap upaya pembobolan. Ketika pengguna memasukkan PIN yang benar, sistem akan mengaktifkan *relay* untuk membuka kunci kotak secara otomatis. Namun, apabila PIN yang dimasukkan salah, sistem akan memberikan respon peringatan melalui *buzzer* yang menyala dengan intensitas berbeda sesuai jumlah kesalahan.

Keunggulan lain dari sistem ini adalah penggunaan sensor ultrasonik HC-SR04 yang diposisikan untuk mendeteksi perubahan posisi vertikal kotak amal secara *real-time*. Ketika terjadi perpindahan kotak amal, data jarak yang terdeteksi akan dikirimkan langsung oleh ESP32 unit *master* ke ESP32 unit *slave* melalui komunikasi ESP-NOW, sebuah protokol nirkabel yang tidak memerlukan koneksi internet. Unit *slave* kemudian



memproses informasi tersebut untuk memicu notifikasi suara adaptif menggunakan *DFPlayer Mini* yang terhubung ke *speaker*.

Dengan pendekatan ini, sistem mampu memberikan respons lokal secara cepat tanpa ketergantungan pada jaringan, serta memperkuat aspek keamanan dengan kombinasi autentikasi PIN, kunci elektrik, peringatan *buzzer*, dan peringatan suara yang proporsional terhadap ancaman. Sistem ini diharapkan dapat menjadi solusi praktis dan efisien bagi pengelola kotak amal dalam mencegah upaya akses tidak berwenang serta memberikan rasa aman terhadap dana yang dihimpun dari masyarakat.

METODE

1. Persiapan Alat dan Bahan

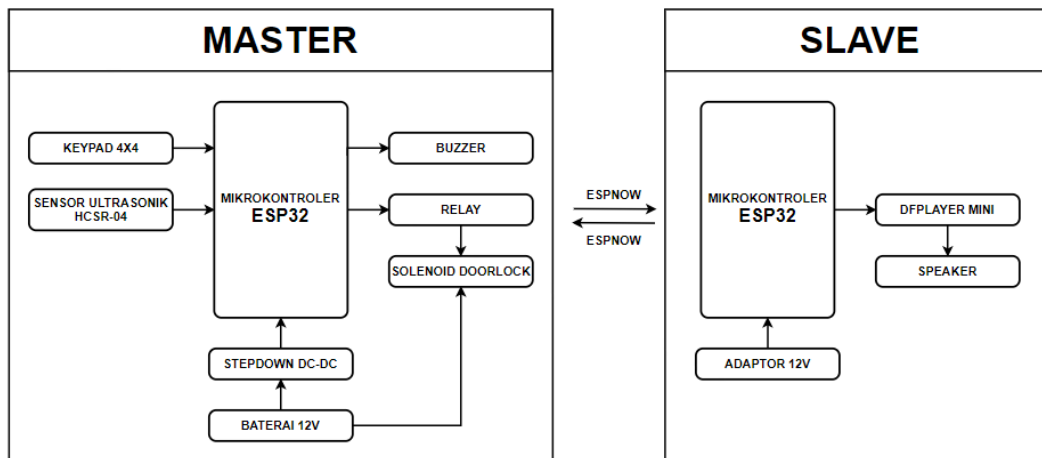
Persiapan alat dan bahan dilakukan untuk menentukan spesifikasi teknis yang sesuai dengan kebutuhan sistem kotak amal cerdas yang dirancang untuk meningkatkan keamanan dan memberikan respons audio secara adaptif melalui komunikasi nirkabel. Sistem terdiri dari dua unit utama, yaitu unit *master* dan unit *slave*, yang saling berkomunikasi menggunakan protokol ESP-NOW. Pada unit *master*, *adaptor 12 V* digunakan sebagai sumber daya utama, yang kemudian diturunkan tegangannya menggunakan modul *step-down DC-DC* untuk memenuhi kebutuhan berbagai komponen. Mikrokontroler ESP32 berperan sebagai pengendali utama yang mengelola autentikasi melalui *keypad 4x4 I2C*, mengatur penguncian menggunakan *relay* dan solenoid *door lock*, serta mengaktifkan *buzzer* sebagai indikator peringatan lokal. Sensor ultrasonik HC-SR04 berfungsi untuk mendeteksi pergerakan vertikal kotak amal. Unit *slave* terdiri dari ESP32 sebagai penerima sinyal perintah, *DFPlayer Mini* sebagai pemutar audio, dan *speaker* sebagai media *output* suara, yang disuplai oleh *adaptor 5 V*. Seluruh sistem dikembangkan menggunakan perangkat lunak Arduino IDE sebagai platform pemrograman utama. Dengan konfigurasi ini, sistem mampu merespons perubahan posisi kotak amal secara *real-time* dan menyampaikan peringatan secara tepat melalui notifikasi suara.

2. Perancangan Sistem

Sistem kotak amal cerdas ini terdiri dari dua unit utama, yaitu unit *master* dan unit *slave* yang saling terhubung melalui komunikasi nirkabel menggunakan protokol ESP-NOW. Unit *master* berfungsi sebagai pusat kendali yang menggunakan mikrokontroler ESP32 untuk mengatur seluruh komponen seperti *keypad 4x4 I2C* sebagai *input* autentikasi PIN, sensor ultrasonik HC-SR04 untuk mendeteksi sejauh mana kotak terangkat, serta *relay*,



buzzer, dan solenoid *door lock* sebagai aktuator sistem keamanan. Sumber daya pada unit *master* berasal dari baterai 12 volt, yang tegangannya diturunkan menggunakan modul *step-down* DC-DC agar sesuai dengan kebutuhan mikrokontroler dan komponen lainnya. Ketika sensor ultrasonik mendeteksi jarak antara permukaan referensi dan kotak kurang dari 9 cm sistem tidak mengirimkan perintah suara. Namun jika terdeteksi berada dalam rentang 9 – 30 cm, maka unit *master* mengirimkan perintah ke unit *slave* untuk memutar suara peringatan tingkat pertama. Sementara itu, jika jarak terdeteksi melebihi 30 cm, maka akan diputar suara peringatan tingkat kedua. Unit *slave* terdiri dari ESP32, *DFPlayer Mini*, dan *speaker*, serta memperoleh daya dari *adaptor* 12 volt. Dengan blok diagram kerja ini, sistem mampu memberikan respons audio adaptif terhadap perubahan posisi kotak, guna meningkatkan aspek keamanan secara otomatis sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 1.



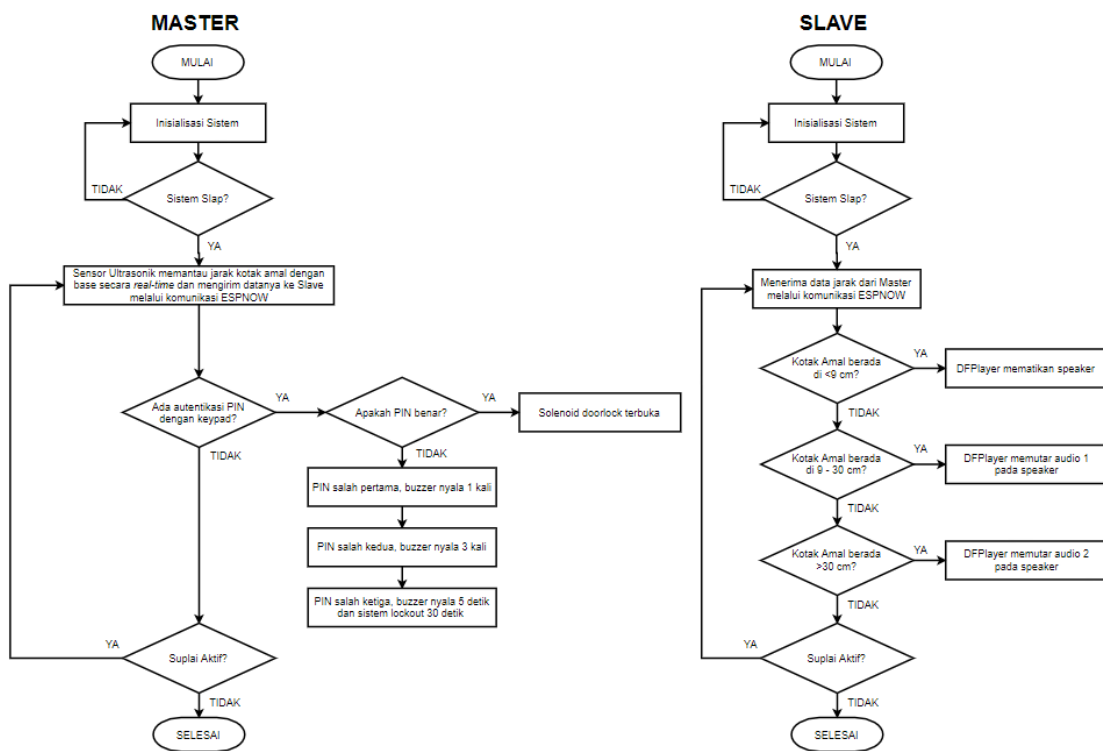
Gambar 1. Blok Diagram Sistem

a. Perancangan Perangkat Lunak

Flowchart sistem kotak amal cerdas terdiri dari dua bagian, yaitu proses pada unit *master* dan unit *slave*. Pada unit *master*, sistem diawali dengan proses inisialisasi kemudian memastikan status aktif sistem. Jika sistem aktif, sensor ultrasonik memantau jarak vertikal kotak amal secara *real-time* dan mengirimkan data tersebut ke unit *slave* melalui komunikasi ESP-NOW. Selanjutnya, sistem memeriksa apakah ada autentikasi PIN melalui *keypad*. Jika tidak ada *input* PIN, maka sistem akan memeriksa status suplai daya. Apabila terdapat *input* PIN, sistem akan mengevaluasi kebenaran PIN. Jika PIN benar, solenoid *door lock* akan terbuka. Namun jika PIN salah, *buzzer* akan menyala secara bertahap. Satu kali pada kesalahan pertama, tiga kali pada kesalahan kedua, dan menyala



selama lima detik serta memicu sistem *lockout* selama tiga puluh detik pada kesalahan ketiga. Sementara itu, pada unit *slave*, sistem juga dimulai dengan inialisasi dan memastikan kondisi aktif. Jika aktif, unit *slave* menerima data jarak dari unit *master* melalui ESP-NOW dan menentukan respon audio yang sesuai. Jika jarak kotak kurang dari 9 cm, *DFPlayer* Mini akan menonaktifkan *speaker*. Jika jarak berada antara 9 hingga 30cm, *DFPlayer* akan memutar audio peringatan tingkat pertama. Sedangkan jika jarak melebihi 30 cm, *DFPlayer* akan memutar audio peringatan tingkat kedua. Kedua proses ini saling terhubung dan bekerja secara sinkron untuk meningkatkan keamanan dan responsifitas sistem terhadap perubahan posisi kotak amal. *Flowchart System* ini dapat dilihat pada Gambar 2.



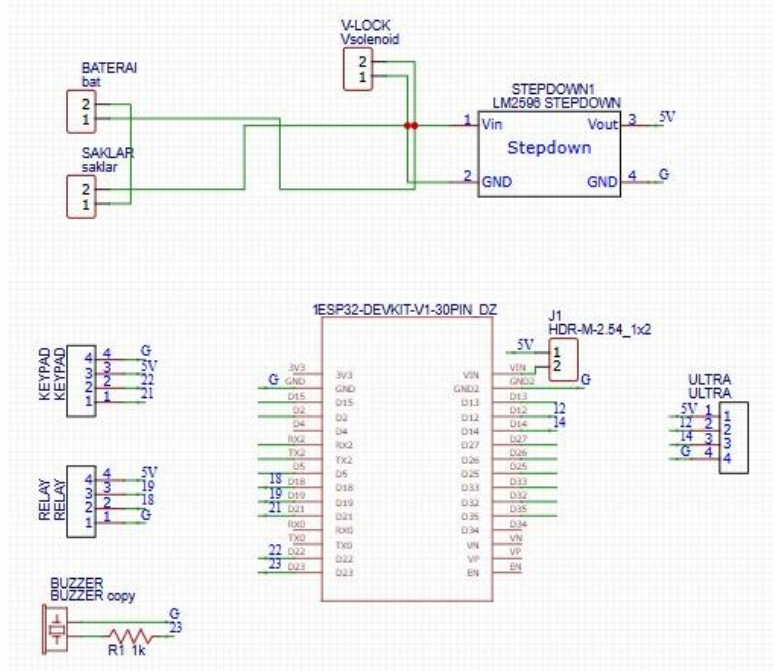
Gambar 2. *Flowchart System*

b. Perancangan Elektronika

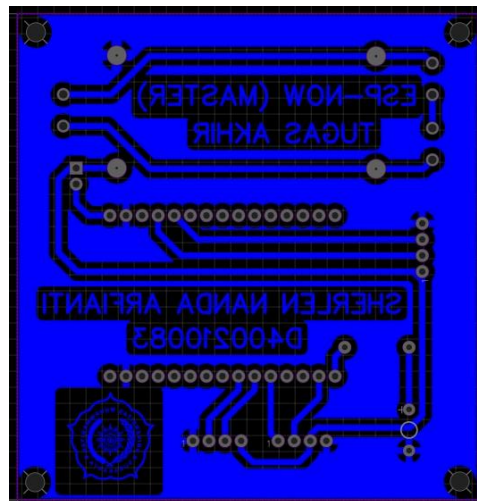
Perancangan sistem elektronik pada penelitian ini dilakukan untuk memastikan koneksi antar komponen utama dan pendukung dapat bekerja secara optimal dan efisien. Proses perancangan dimulai dengan membuat skematik rangkaian menggunakan perangkat lunak EasyEDA, kemudian dilanjutkan dengan pembuatan *layout* PCB untuk setiap perangkat, yaitu perangkat *master* dan perangkat *slave*. Skematik dan *layout* ini berfungsi sebagai panduan dalam perakitan *hardware*, sekaligus memastikan bahwa jalur sinyal



antar pin pada mikrokontroler tersambung dengan tepat dan terhindar dari interferensi. Perancangan juga mempertimbangkan penghematan ruang dan keteraturan jalur agar memudahkan proses solder dan perawatan.



Gambar 3a. Schematic PCB

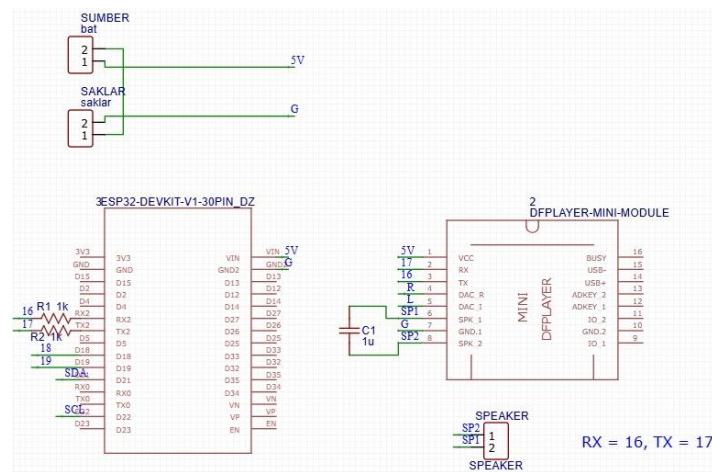


Gambar 3b. Board PCB

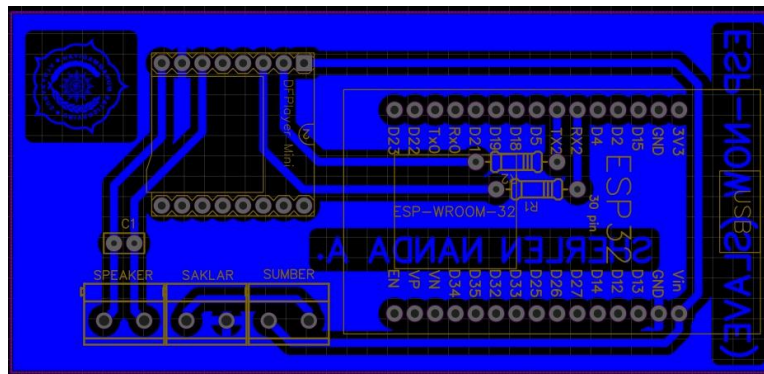
Gambar 3. Desain Layout PCB Perangkat Master



Gambar 3 menampilkan skematik dan *layout* PCB dari perangkat *master* yang dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32. Rangkaian ini terdiri dari koneksi ke *keypad* 4x4, sensor ultrasonik HC-SR04, *relay* untuk mengatur solenoid *door lock*, serta *buzzer* sebagai alarm peringatan. Sistem memperoleh daya dari baterai 12V yang diturunkan menjadi 5V menggunakan modul *stepdown* LM2596, sehingga sesuai untuk ESP32 dan komponen lainnya. Jalur koneksi dirancang secara terstruktur, dimana ESP32 berperan sebagai pengolah utama sinyal *input* dari *keypad* dan sensor, kemudian mengaktifkan *buzzer* atau *relay* berdasarkan logika program. Semua koneksi diletakkan pada satu sisi PCB dengan tata letak yang ringkas namun tetap memperhatikan alur logika dan kebutuhan *grounding* untuk menghindari *noise*.



Gambar 4a. Schematic PCB



Gambar 4b. Board PCB

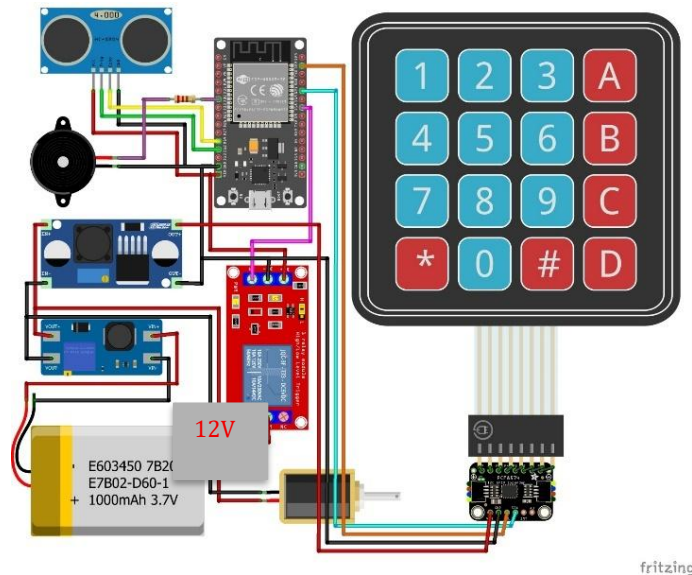
Gambar 4. Desain *Layout* PCB Perangkat *Slave*



Sementara itu, Gambar 4 memperlihatkan rancangan skematik dan *layout* PCB dari perangkat *slave*. Perangkat ini berfungsi sebagai penerima data jarak kotak amal dari unit *master* melalui protokol komunikasi ESP-NOW. Komponen utama pada perangkat ini adalah ESP32 dan *DFPlayer* Mini yang bertugas memutar suara melalui *speaker* berdasarkan perintah yang diterima. ESP32 menerima data serial melalui pin RX dan TX (dengan konfigurasi RX di pin GPIO16 dan TX di GPIO17) dan mengaktifkan *DFPlayer* untuk memutar suara yang sesuai berdasarkan jarak yang terdeteksi. Rangkaian ini juga dilengkapi saklar dan catu daya eksternal 5V, serta kapasitor 1 μ F sebagai penstabil tegangan untuk mencegah gangguan pada modul audio. *Layout* PCB disusun secara linear dan ringkas untuk mendukung efisiensi perakitan dengan jalur koneksi yang memisahkan sisi *input*, pemrosesan, dan *output* suara secara jelas sehingga meminimalkan kemungkinan gangguan sinyal.

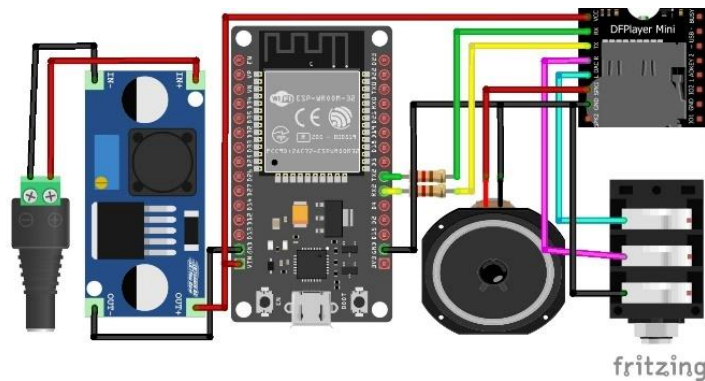
c. Perancangan *Hardware*

Perancangan *hardware* dari sistem ini disusun menggunakan *software* Fritzing dapat dilihat pada pada Gambar 5.



Gambar 5a. Perangkat *Master*





Gambar 5b. Perangkat *Slave*

Gambar 5. *Wiring Diagram System*

Perancangan *wiring diagram* pada Gambar 5 bertujuan untuk menunjukkan hubungan fisik antar komponen dalam sistem kotak amal berbasis ESP32, yang terdiri atas dua bagian utama, yaitu perangkat *master* dan perangkat *slave*.

Perangkat *Master* tersusun atas berbagai komponen yang saling terhubung untuk mengatur sistem autentikasi dan penguncian. Mikrokontroler ESP32 berperan sebagai pusat pengendali yang terhubung ke *keypad* 4x4 sebagai media autentikasi pengguna. Sensor ultrasonik HC-SR04 digunakan untuk mendeteksi pergerakan vertikal kotak amal, dengan koneksi pin trigger dan echo ke mikrokontroler. Sinyal digital dari *buzzer* diaktifkan melalui pin *output* ESP32 sebagai indikator bunyi saat terjadi kesalahan autentikasi PIN. Sementara itu, *relay* dikendalikan oleh ESP32 untuk membuka dan menutup solenoid *door lock* sebagai sistem penguncian. Komponen *step-down converter* berfungsi menurunkan tegangan dari baterai 12 V menjadi 5 V untuk mencatu daya ke seluruh rangkaian. Modul komunikasi ESP-NOW juga berjalan pada ESP32, sehingga data dari sensor ultrasonik dapat dikirim ke perangkat *slave* secara nirkabel tanpa koneksi internet.

Perangkat *Slave* dirancang lebih sederhana karena berfungsi sebagai penerima data jarak dari perangkat *master* dan memprosesnya menjadi sinyal audio. ESP32 menerima data melalui komunikasi ESP-NOW dan kemudian mengirimkan perintah serial ke *DFPlayer Mini* untuk memutar suara. Keluaran audio dari *DFPlayer* disalurkan ke *speaker* sebagai bentuk peringatan lokal. Resistor ditambahkan pada jalur RX *DFPlayer* untuk menurunkan tegangan sinyal dari ESP32. Catu daya diberikan dari *adaptor* eksternal 5V yang mengalir ke ESP32 dan seluruh komponen lainnya. Sensor ultrasonik juga terhubung ke ESP32 pada bagian *slave* sebagai cadangan fungsi deteksi tambahan, walaupun secara utama data sensor dikirim dari perangkat *master*.



Secara keseluruhan, desain *wiring* ini memastikan bahwa setiap komponen memperoleh suplai daya yang stabil dan dapat berfungsi sesuai peran masing-masing dalam sistem pengamanan kotak amal berbasis ESP32 yang terintegrasi secara nirkabel melalui ESP-NOW.

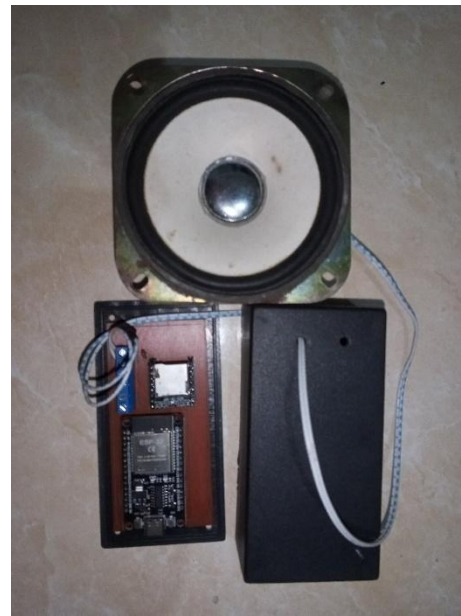
HASIL

1. Hasil Perancangan Sistem

Perancangan perangkat keras (*hardware*) dilakukan sebagai tahapan akhir dalam pembangunan sistem yang bertujuan untuk mengintegrasikan seluruh komponen elektronik ke dalam bentuk fisik kotak amal yang kokoh dan fungsional. Desain fisik disesuaikan agar mampu menampung rangkaian elektronik sekaligus menjaga estetika dan keamanan perangkat.



Gambar 6a. Tampak Depan



Gambar 6b. Tampak Belakang

Gambar 6. *Hardware Perangkat Slave*

Perangkat *slave* terdiri atas rangkaian ESP32, DFPlayer Mini, dan *speaker* yang disusun dalam *casing* kompak berwarna hitam. *Casing* ini dirancang untuk melindungi seluruh rangkaian dari debu dan gangguan luar serta memudahkan pemasangan di berbagai posisi. Tampilan luar menunjukkan kesederhanaan bentuk, sementara bagian dalam menampakkan susunan komponen elektronik yang tertata rapi dan efisien untuk mendukung fungsionalitas notifikasi audio berdasarkan sinyal dari perangkat *master*.

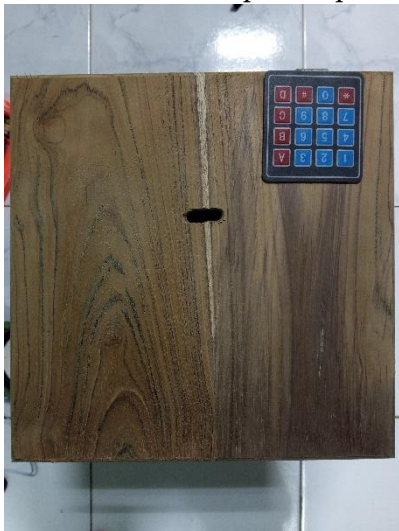




Gambar 7a. Tampak Depan



Gambar 7b. Tampak Samping



Gambar 7c. Tampak Atas



Gambar 7d. Tampak Dalam

Gambar 7. *Hardware Perangkat Slave*

Perangkat *master* dirakit menggunakan kotak berbahan kayu dengan dimensi yang berfungsi sebagai wadah sekaligus simulasi fisik dari kotak amal. Kayu dipilih karena mudah dibentuk, tahan lama, serta mencerminkan tampilan kotak amal yang sering digunakan di tempat ibadah. Bagian atas menampilkan *keypad* sebagai alat autentikasi PIN, sedangkan bagian dalam menyimpan rangkaian utama seperti ESP32, sensor ultrasonik, *relay*, *buzzer*, dan sistem penguncian solenoid. Tata letak komponen diatur agar mudah diakses saat perawatan maupun pengujian sistem.



PEMBAHASAN

1. Hasil Pengujian

1.1. Pengujian *Keypad*

Pengujian *keypad* dilakukan untuk memastikan bahwa sistem dapat membedakan antara *input* sandi yang benar dan yang salah serta memberikan respons yang sesuai pada aktuator solenoid dan *buzzer*. Dalam pengujian ini, digunakan kombinasi sandi “1234” sebagai kode autentikasi yang benar. Sistem diuji sebanyak beberapa kali dengan dua kondisi *input*, yaitu sandi yang benar dan sandi yang salah secara berturut-turut hingga tiga kali untuk mengetahui respons sistem terhadap kesalahan berulang. Hasil pengujian disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Pengujian *Keypad*

No.	<i>Input</i> Sandi	Percobaan ke-	Status Sandi	<i>Output</i> Solenoid	Keterangan
1.	1234	1	Benar	Open	Sandi Sesuai, Sistem Aktif
2.	1234	1	Benar	Open	Sandi Sesuai, Sistem Aktif
3.	5678	1	Salah	Close	Salah Pertama
4.	1239	2	Salah	Close	Salah Kedua
5.	4321	3	Salah	Close	Salah Ketiga, Sistem <i>Lockout</i>

Berdasarkan hasil pada Tabel 1, dapat disimpulkan bahwa sistem berhasil mengenali sandi yang benar dan memberikan *output* berupa aktivasi solenoid (status *Open*) sebagai tanda penguncian terbuka. Sebaliknya, saat sandi yang salah dimasukkan, sistem tetap menjaga solenoid dalam kondisi tertutup (status *Close*) dan menyalakan *buzzer* sebagai bentuk peringatan. Pada kesalahan ketiga secara berturut-turut, sistem masuk ke dalam mode penguncian sementara (*lockout*) sebagai upaya pencegahan akses paksa. Hal ini menunjukkan bahwa sistem telah bekerja sesuai rancangan, dengan tingkat sensitivitas dan akurasi yang baik dalam menangani autentikasi berbasis sandi.



1.2. Pengujian *Buzzer*

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi pola respon *buzzer* yang dihasilkan sistem ketika terjadi kesalahan dalam memasukkan sandi autentikasi pada *keypad*. Sistem dirancang untuk memberikan peringatan bertingkat berdasarkan jumlah kesalahan yang dilakukan secara berurutan. Tingkat peringatan ini diklasifikasikan menjadi tiga kategori, yaitu peringatan ringan, sedang, dan keras, yang ditandai oleh pola bunyi *buzzer* yang berbeda. Hasil pengujian disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Pengujian *Buzzer*

No	Jumlah Salah	Pola <i>Buzzer</i>	Lama <i>Buzzer</i>	Keterangan
1	1x	Beep 1x	< 1 Detik	Peringatan Ringan
2	2x	Beep 3x	< 2 Detik	Peringatan Sedang
3	3x	<i>Buzzer</i> Menyala Terus	5 Detik	Peringatan Keras, Sistem <i>Lockout</i>

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem berhasil menampilkan pola respon *buzzer* yang konsisten dan sesuai dengan jumlah kesalahan *input* yang dilakukan. Pada kesalahan pertama, *buzzer* menghasilkan bunyi pendek satu kali sebagai peringatan ringan, tanpa mengganggu sistem secara signifikan. Ketika kesalahan dilakukan dua kali berturut-turut, *buzzer* menghasilkan tiga bunyi pendek sebagai sinyal peringatan tingkat sedang. Pada kesalahan ketiga, sistem memicu *buzzer* untuk menyala secara terus menerus selama lima detik sebagai peringatan keras, sekaligus mengaktifkan sistem *lockout* atau penguncian sementara guna mencegah upaya akses berulang. Pola peringatan bertingkat ini efektif dalam memberikan umpan balik yang jelas kepada pengguna dan memperkuat lapisan keamanan pada sistem autentikasi berbasis sandi.

1.3. Pengujian Sensor Ultrasonik

Pengujian sensor ultrasonik dilakukan untuk mengetahui keakuratan sistem dalam mendeteksi perubahan posisi vertikal kotak amal terhadap permukaan alas atau *base*. Sensor ini berfungsi sebagai pemacu sistem peringatan audio adaptif melalui komunikasi ESP-NOW, yang akan mengirimkan sinyal ke unit *slave* berdasarkan kategori jarak



tertentu. Setiap kategori jarak dikaitkan dengan perintah pemutaran audio berbeda oleh *DFPlayer* Mini sebagai bentuk peringatan tingkat risiko. Jarak dibagi ke dalam tiga kategori utama: terlalu dekat, waspada, dan bahaya. Pengujian dilakukan dengan mengubah posisi kotak amal secara bertahap dan mencatat keluaran sistem terhadap masing-masing jarak. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Pengujian Sensor Ultrasonik

No	Jarak (Cm)	Kategori Jarak	Keterangan
1	< 9	Terlalu Dekat	<i>DFPlayer</i> Tidak Bunyi
2	9–30	Waspada	Mengirim Sinyal Suara 1 Ke <i>Slave</i>
3	> 30	Bahaya	Mengirim Sinyal Suara 2 Ke <i>Slave</i>

Dari hasil pengujian pada Tabel 3, dapat disimpulkan bahwa sensor ultrasonik bekerja secara efektif dalam membedakan jarak vertikal kotak amal dan memberikan respon yang sesuai. Ketika jarak kurang dari 9 cm, sistem mendeteksi bahwa kotak masih berada dalam posisi normal, sehingga *DFPlayer* Mini pada unit *slave* tidak mengeluarkan suara. Pada rentang 9 hingga 30 cm, sistem mengklasifikasikan kondisi sebagai “waspada” dan mengirimkan sinyal ke *slave* untuk memutar suara peringatan pertama. Sementara itu, jika jarak lebih dari 30 cm, sistem menandainya sebagai kondisi “Bahaya”, namun dalam konteks ini berarti kotak telah terangkat secara signifikan, sehingga dikirimkan sinyal untuk memutar suara peringatan kedua. Pola kerja ini menunjukkan bahwa sistem telah mampu memberikan deteksi jarak yang sensitif, adaptif, dan responsif terhadap kondisi di lapangan, serta efektif dalam meningkatkan aspek kewaspadaan lokal melalui peringatan suara.

1.4. Pengujian Komunikasi ESP-NOW

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi keandalan komunikasi nirkabel antara perangkat *master* dan *slave* menggunakan protokol ESP-NOW. Protokol ini dipilih karena tidak memerlukan koneksi internet dan mampu mengirim data secara langsung dengan latensi rendah. Dalam sistem ini, perangkat *master* akan mengirimkan sinyal berdasarkan hasil pembacaan sensor ultrasonik, dan perangkat *slave* merespons dengan memutar suara peringatan melalui *DFPlayer* Mini sesuai perintah yang diterima. Pengujian dilakukan pada tiga kondisi jarak berbeda antara kotak amal dan permukaan dasar untuk menilai kestabilan pengiriman data, kecepatan respon, serta kesesuaian keluaran suara pada *slave*. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 4.



Tabel 4. Pengujian Komunikasi ESP-NOW

No	Kondisi Jarak	Data Terkirim	Waktu Pengiriman (detik)	Respon <i>Slave</i> (Suara)	Keterangan
1	7 cm	Diam	-	Tidak ada suara	Jarak pendek, sistem tenang
2	10 cm	Suara 1	1,02	<i>DFPlayer</i> mainkan suara 1	Waspada
3	40 cm	Suara 2	0,46	<i>DFPlayer</i> mainkan suara 2	Aman

Hasil pengujian pada Tabel 4 menunjukkan bahwa sistem komunikasi ESP-NOW bekerja dengan andal dalam mengirimkan data dari *master* ke *slave* dengan waktu pengiriman yang relatif cepat. Pada jarak kurang dari 9 cm, sistem tidak mengirimkan data karena kondisi dianggap aman atau normal sehingga tidak dibutuhkan peringatan suara. Saat jarak mencapai 10 cm, perangkat *master* mengirimkan perintah untuk memutar suara 1 yang diterima dan dieksekusi oleh *DFPlayer* Mini dengan waktu pengiriman sekitar 1,02 detik, menandakan tingkat kewaspadaan awal. Sementara pada jarak 40 cm, *master* mengirimkan perintah suara 2 dengan waktu pengiriman hanya 0,46 detik yang mengindikasikan perpindahan signifikan kotak amal dan potensi ancaman. Waktu respon yang singkat serta keakuratan pemutaran suara oleh perangkat *slave* membuktikan bahwa ESP-NOW mampu menjadi solusi komunikasi yang efisien, cepat, dan stabil dalam sistem keamanan lokal tanpa ketergantungan pada infrastruktur jaringan internet.

1.5. Pengujian Baterai

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui seberapa lama sistem dapat beroperasi dengan menggunakan sumber daya baterai lithium berkapasitas 4800 mAh pada tegangan 11,1 volt. Seluruh komponen dalam sistem diaktifkan secara bersamaan untuk mensimulasikan kondisi *full load*, di mana perangkat seperti ESP32, sensor ultrasonik, *keypad*, *relay*, solenoid, *buzzer*, serta komunikasi ESP-NOW berjalan secara simultan. Arus total yang dikonsumsi sistem diukur menggunakan alat ukur digital, dan dari data tersebut dihitung estimasi waktu operasi sistem. Selanjutnya, hasil estimasi dibandingkan dengan waktu aktual saat sistem benar-benar digunakan secara kontinu hingga daya



baterai habis. Perbandingan ini penting untuk mengetahui akurasi estimasi serta efisiensi konsumsi daya sistem secara keseluruhan. Hasil pengujian disajikan dalam Tabel 5.

Tabel 5. Pengujian Baterai

No	Kapasitas Baterai (Mah)	Tegangan Baterai (V)	Arus Total Sistem (A)	Estimasi Waktu Operasi (Jam)	Waktu Aktual (Hasil Uji)	Selisih (Jam)	Keterangan
1	4800	11,1	0,9	5,33	4,9	-0,43	Full Load (Semua Modul Aktif Stabil)

Hasil pengujian menunjukkan bahwa dengan kapasitas baterai sebesar 4800 mAh dan tegangan 11,1 volt, sistem mampu beroperasi selama 4,9 jam dalam kondisi beban penuh (*full load*). Estimasi awal waktu operasi sebesar 5,33 jam memiliki selisih sebesar -0,43 jam (sekitar 26 menit) dibandingkan dengan hasil aktual. Perbedaan ini tergolong kecil dan masih dalam batas toleransi, mengingat faktor eksternal seperti fluktuasi arus saat modul tertentu aktif (*relay* atau *buzzer* menyala) dapat memengaruhi konsumsi daya sesaat. Secara keseluruhan, pengujian ini menunjukkan bahwa sistem memiliki efisiensi energi yang cukup baik dan dapat diandalkan untuk operasional jangka pendek menengah tanpa koneksi langsung ke sumber listrik permanen. Data ini juga berguna dalam perencanaan pengisian ulang dan manajemen daya untuk penggunaan lapangan.

KESIMPULAN

Pengembangan sistem keamanan kotak amal ini berhasil ditunjukkan melalui hasil implementasi dan pengujian yang membuktikan bahwa seluruh fitur yang dirancang dapat bekerja sesuai dengan tujuan. Sistem memanfaatkan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali yang terhubung dengan *keypad* 4x4 untuk autentikasi sandi PIN, solenoid *door lock* untuk penguncian otomatis, serta sensor ultrasonik untuk memantau perpindahan vertikal kotak amal. Data jarak yang diperoleh dari sensor dikirim ke perangkat *slave* menggunakan komunikasi nirkabel ESP-NOW, kemudian direspons oleh *DFPlayer* Mini dalam bentuk peringatan suara yang berbeda sesuai dengan tingkat pergerakan kotak. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi perubahan posisi dan mengirimkan data ke *slave* secara cepat dengan waktu pengiriman minimum mencapai 0,46 detik. Selain itu, saat terjadi kesalahan dalam memasukkan PIN,



sistem memberikan peringatan melalui *buzzer* dengan pola suara bertingkat, memperlihatkan mekanisme pengamanan lokal yang adaptif. Dari sisi efisiensi energi, sistem dapat bertahan selama 4,9 jam dalam kondisi seluruh modul aktif, menunjukkan ketahanan daya yang mendekati estimasi awal. Berdasarkan capaian tersebut, sistem ini dapat dikategorikan sebagai solusi keamanan kotak amal yang efektif, independen dari koneksi internet, dan mampu memberikan respons lokal yang cepat serta informatif.

Untuk pengembangan sistem ini di masa mendatang agar lebih optimal, berikut beberapa saran yang dapat dipertimbangkan :

1. Integrasi modul GPS untuk pemantauan lokasi kotak amal secara *real-time* sehingga memudahkan pelacakan apabila kotak dipindahkan dari tempat semestinya.
2. Penambahan modul kamera seperti ESP32-CAM yang berfungsi untuk mengambil gambar atau video saat terjadi upaya akses yang mencurigakan, guna memperkuat bukti visual dan membantu proses identifikasi pelaku.
3. Implementasi sensor getar untuk mendeteksi aktivitas fisik mencurigakan seperti guncangan atau upaya pembongkaran paksa terhadap kotak amal.
4. Konektivitas berbasis IoT misalnya melalui integrasi jaringan *Wi-Fi* dan bot Telegram agar sistem dapat mengirimkan notifikasi secara *real-time* kepada pengelola melalui perangkat seluler.

UCAPAN TERIMA KASIH

Segala puji bagi Allah SWT atas limpahan nikmat, kesehatan, dan kemudahan yang diberikan sehingga penulisan artikel ilmiah ini dapat diselesaikan hingga tahap akhir. Seluruh proses penelitian hingga penyusunan karya ini tidak terlepas dari dukungan berbagai pihak yang secara langsung maupun tidak langsung memberikan kontribusi. Penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Kedua orang tua dan keluarga yang selalu menjadi sumber kekuatan, motivasi, dan doa dalam setiap langkah perjuangan akademik ini.
2. Bapak Aris Budiman, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing atas kesabaran, bimbingan ilmiah, serta arahan yang konstruktif selama proses penelitian dan penyusunan artikel ini.



3. Seluruh dosen dan tenaga pengajar di Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Surakarta yang telah membekali penulis dengan ilmu dan pengalaman berharga selama masa studi.
4. Teman-teman seperjuangan Teknik Elektro Rayden 2021 atas kebersamaan, diskusi, dan dukungan yang sangat berarti selama menempuh perjalanan akademik ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Alawi, M. Al, & Rastika, I. (2025). Terekam CCTV Saat Curi Kotak Amal Kuburan, 2 Pria di Ngawi Ditangkap Warga. *Kompas.Com*. <https://surabaya.kompas.com/read/2025/03/28/070121978/terekam-cctv-saat-curi-kotak-amal-kuburan-2-pria-di-ngawi-ditangkap-warga.com>
- [2] Mindasari, S., As'ad, M., & Meilantika, D. (2022). Sistem Keamanan Kotak Amal di Musala Sabilul Khasanah Berbasis Arduino UNO. *Jurnal Teknik Informatika Mahakarya (JTIM)*, 5(2), 7–13.
- [3] Muhhana, F. A. (2024). *Rancang Bangun Kotak Amal Cerdas Berbasis IoT (Internet Of Things)*.
- [4] Noerifanza, A. (2022). Analisa Performa Modul ESP32 Sebagai Perangkat untuk Sistem Pengenalan Objek. *Journal of Computer Electronic and Telecommunications*, 2. <https://doi.org/10.52435/complete.v3i2.263>
- [5] Perdana, N., & Gonsaga, A. (2025). Videonya Viral, Pria Spesialis Maling Kotak Amal di Malang Diamankan Warga saat Hendak Beraksi. *Kompas.Com*. <https://surabaya.kompas.com/read/2025/02/07/162737878/videonya-viral-pria-spesialis-maling-kotak-amal-di-malang-diamankan-warga.com>
- [6] Pratama, I., & Pramudya, A. (2023). Sistem Kontrol Keamanan Pada Kotak Amal Berbasis Arduino Uno Dan Sim 800L. *Jurnal Teknik Elektro*, 7(1), 23. <https://doi.org/10.31000/jte.v7i1.9788>
- [7] Suriana, I. W., Setiawan, I. G. A., & Graha, I. M. S. (2022). Rancang Bangun Sistem Pengaman Kotak Dana Punia berbasis Mikrokontroler NodeMCU ESP32 dan Aplikasi Telegram. *Jurnal Ilmiah Telsinas Elektro, Sipil Dan Teknik Informasi*, 4(2). <https://doi.org/10.38043/telsinas.v4i2.3198>

