

# Pengembangan Sistem Pengawasan IoT Berbasis ESP32-CAM dengan PCB, Casing 3D, dan Panel Surya

1<sup>st</sup> Azmi Taquiuddin Syah  
Fakultas Teknik Elektro  
Universitas Telkom  
Bandung, Indonesia

miuddinsyah@student.telkomuniversity.ac.id

2<sup>nd</sup> Ir.Burhanuddin Dirgantoro, M.T.  
Fakultas Teknik Elektro  
Universitas Telkom  
Bandung, Indonesia

burhanuddin@telkomuniversity.ac.id

3<sup>rd</sup> Hasbi Ash Shiddieqy, S.T., M.T.  
Fakultas Teknik Elektro  
Universitas Telkom  
Bandung, Indonesia

hasbisiddiq@telkomuniversity.ac.id

**Abstrak**—Kejahatan pencurian yang sering terjadi di kawasan Perumahan Mekarsari Endah menunjukkan bahwa sistem keamanan yang ada masih belum optimal. Oleh karena itu, pada tugas akhir ini dikembangkan sistem pengawasan otomatis berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan ESP32-CAM dan sensor PIR. Sistem ini dapat mendeteksi gerakan secara real-time, mengambil gambar, dan mengirimkan notifikasi secara otomatis melalui aplikasi Telegram. Sistem dirancang untuk aktif pada malam hari, saat risiko pencurian lebih tinggi, serta dilengkapi dengan fitur tambahan seperti pengaturan waktu otomatis dan kontrol manual melalui perintah Telegram. Untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem di lapangan, dilakukan pengembangan sistem daya mandiri menggunakan tiga buah panel surya 6V 200mA yang dirangkai secara paralel. Sistem ini diuji dengan modul pengatur daya TP4056 dan baterai 18650, serta didukung buck converter agar tegangan tetap stabil meskipun intensitas cahaya matahari berubah. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat beroperasi dengan waktu respons rata-rata 1,2 detik dan tetap stabil selama 48 jam tanpa gangguan. Sistem ini diharapkan dapat menjadi solusi praktis dan hemat energi untuk meningkatkan keamanan perumahan.

**Kata kunci**— ESP32-CAM, Internet of Things, Keamanan Rumah, Panel Surya, Telegram Bot, PIR

## I. PENDAHULUAN

Perumahan Mekarsari Endah di Kabupaten Bandung selama ini masih rawan terhadap tindak pencurian, terutama pada malam hari ketika aktivitas warga sudah menurun. Meskipun terdapat beberapa kamera CCTV dan petugas keamanan (satpam), tingkat respons dan cakupan monitoring dinilai masih kurang memadai, sehingga pelaku dapat dengan mudah melakukan aksi pencurian pada rumah yang dalam keadaan kosong atau minim pengawasan.

Tindak pencurian yang sering muncul biasanya menargetkan perhiasan maupun kendaraan bermotor yang ditinggal tanpa pengamanan lebih, dengan kerugian finansial mencapai puluhan hingga ratusan juta rupiah. Kondisi ini menimbulkan rasa khawatir yang tinggi di kalangan penghuni, sekaligus menurunkan tingkat kepercayaan

masyarakat terhadap efektivitas sistem keamanan konvensional seperti CCTV dan patroli satpam.

Upaya peningkatan keamanan saat ini meliputi penambahan titik pemasangan CCTV dan penambahan personel satpam, namun dua solusi tersebut masih memiliki kelemahan. Pemasangan CCTV seringkali kurang optimal di lokasi minim pencahayaan, sehingga rekaman gambar malam hari menjadi kurang jelas. Sementara itu, kehadiran satpam tanpa dukungan sistem otomatis cenderung kurang efektif untuk memantau area yang luas secara terus-menerus.

Untuk menjawab permasalahan tersebut, tugas akhir ini mengusulkan pengembangan Automated Housing Surveillance System berbasis Internet of Things (IoT) yang memanfaatkan modul ESP32-CAM dan sensor PIR, serta terintegrasi dengan bot Telegram. Sistem ini dirancang untuk bekerja secara real-time mendeteksi gerakan, menangkap gambar, dan mengirim notifikasi secara otomatis ke aplikasi Telegram sehingga dapat meningkatkan kecepatan respons dan efektivitas pengawasan di lingkungan perumahan.

## II. KAJIAN TEORI

Pada kajian teori ini, akan dibahas konsep-konsep utama yang menjadi landasan pengembangan sistem pengawasan otomatis berbasis IoT, meliputi Internet of Things, modul ESP32-CAM, sensor PIR, protokol komunikasi MQTT, Telegram Bot, serta integrasi pemrosesan cloud dengan model YOLOv8.

### A. Internet of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) mengacu pada konsep di mana objek fisik—dilengkapi dengan sensor, aktuator, dan kemampuan komunikasi—terhubung ke internet [1] untuk saling bertukar data secara real-time. Melalui arsitektur IoT, perangkat-perangkat ini dapat memantau kondisi lingkungan, mengirimkan notifikasi, dan melakukan kontrol jarak jauh tanpa intervensi manusia secara langsung.

## B. Modul ESP32-CAM

ESP32-CAM adalah modul mikrokontroler berbasis prosesor dual-core Xtensa® LX6 hingga 240 MHz, dilengkapi kamera OV2640 (hingga 1.6 MP), slot microSD, dan konektivitas Wi-Fi/Bluetooth. [2]

## C. ESP32-WROOM

ESP32-WROOM adalah modul Wi-Fi & Bluetooth berdaya rendah yang memuat prosesor dual-core Xtensa® LX6 hingga 240 MHz, flash 4 MB, dan RAM 520 kB. Sebagai master node dalam arsitektur sistem pengawasan

## D. Sensor PIR (Passive Infrared)

Sensor PIR (HC-SR501) mendeteksi gerakan objek berdasarkan perubahan radiasi inframerah di sekitarnya. [3] Keunggulan PIR antara lain tahan terhadap perubahan suhu dan pencahayaan.

## E. Protokol Komunikasi MQTT

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) adalah protokol publish-subscribe ringan [4] yang banyak digunakan pada aplikasi IoT karena efisiensi bandwidth dan dukungan untuk topologi terdistribusi. Dengan MQTT, ESP32-CAM dan ESP32-WROOM dapat dipisahkan dalam arsitektur master-slave: ESP32-WROOM mengelola logika sistem, sinkronisasi waktu (NTP), dan komunikasi Telegram, sementara ESP32-CAM berfokus pada fungsi kamera dan berlangganan perintah melalui broker MQTT.

## F. Telegram Bot

Telegram Bot berfungsi sebagai antarmuka pengguna utama, menyediakan kontrol jarak jauh, notifikasi real-time, dan perintah interaktif untuk sistem pengawasan. Pembuatan bot dimulai melalui layanan resmi BotFather pada Telegram, yang menghasilkan token API [5] untuk autentikasi. Token ini selanjutnya ditanamkan pada kode ESP32 untuk mengirim dan menerima perintah seperti /photo, /sensor, atau /setschedule serta menyalurkan tanggapan berupa gambar atau notifikasi secara privat kepada pengguna terdaftar.

## G. PlatformIO

PlatformIO adalah ekosistem open-source untuk pengembangan firmware [6] pada berbagai papan mikrokontroler, termasuk ESP32. Terintegrasi sebagai ekstensi di Visual Studio Code, PlatformIO menyediakan manajemen dependensi pustaka yang terstruktur (via platformio.ini), sistem kompilasi yang stabil, dan dukungan multi-environment untuk pengujian di berbagai board secara paralel. Dengan PlatformIO, proses upload firmware ke ESP32-CAM menjadi lebih andal dan mudah dikonfigurasi dibandingkan dengan Arduino IDE konvensional.

## H. Autodesk Fusion

Autodesk Fusion (sebelumnya Fusion 360) adalah platform CAD/CAM/CAE/PCB berbasis cloud [7] yang mengintegrasikan perancangan 3D, simulasi, CAM, dan manajemen data dalam satu antarmuka. Fitur Generative

Design memungkinkan eksplorasi desain berbasis kecerdasan buatan untuk mengoptimalkan struktur fisik komponen. Autodesk Fusion ideal untuk mendesain enclosure dan komponen mekanik seperti kotak pelindung untuk modul ESP32-CAM dengan kemampuan rendering cloud dan kolaborasi real-time antar-anggota tim.

## I. EasyEDA

EasyEDA adalah platform daring untuk perancangan skematik dan tata letak PCB [8] secara terintegrasi. Menggunakan EasyEDA, penulis membuat modul ESP32-WROOM shield dengan layout jejak yang optimal, termasuk proteksi flyback dan routing ground pour, tanpa perlu perangkat lunak desktop berat. Hasil desain kemudian diekspor langsung dalam format Gerber untuk fabrikasi, mempermudah iterasi prototipe PCB custom untuk sistem pengawasan perumahan.

## J. Integrasi Pemrosesan Cloud dengan YOLOv8

Untuk menambah kecerdasan sistem dalam mengenali dan mengklasifikasi objek, gambar yang diambil ESP32-CAM dikirim ke server cloud yang menjalankan model deteksi objek YOLOv8 [9] melalui REST API. Server menerima image input via HTTP POST, memprosesnya menggunakan YOLOv8, dan mengembalikan hasil anotasi (bounding box dan confidence score) dalam format JSON. Hasil ini dapat disajikan kepada pengguna baik sebagai teks terstruktur maupun gambar beranotasi, membuka peluang fitur lanjutan seperti pengenalan kendaraan atau deteksi aktivitas mencurigakan.

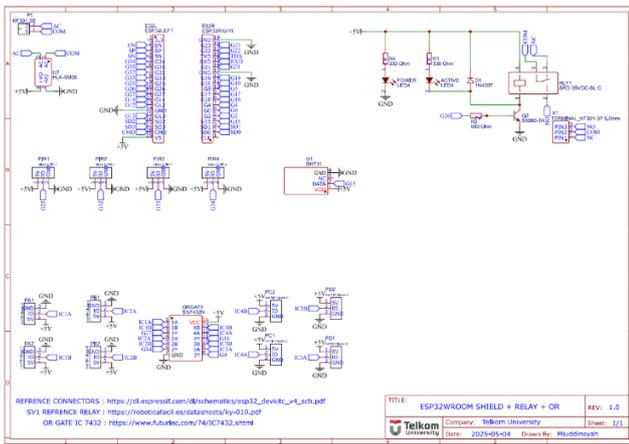
## III. METODE

Menguraikan secara mendetail langkah-langkah pengembangan sistem pengawasan otomatis berbasis IoT, dimulai dari desain hardware awal, iterasi rancangan PCB, pembuatan enclosure 3D, implementasi firmware beserta mekanisme Telegram, hingga prosedur pengujian dan validasi sistem.

### A. Desain Hardware Awal

Rangkaian prototipe dibangun dengan menggabungkan modul ESP32-CAM dan sensor PIR HC-SR501 sebagai Node Slave dan pada satu papan breadboard, serta modul ESP32-WROOM sebagai node master.

Sensor PIR dihubungkan ke pin GPIO 2 pada ESP32-CAM dan dipasang tegangan 5 V melalui pin VIN, sementara referensi ground dihubungkan bersama antara sensor dan modul. Ketika PIR mendeteksi perubahan radiasi inframerah, sinyal HIGH memicu fungsi interrupt `esp_camera_fb_get()`, yang kemudian menangkap gambar dengan kamera OV2640. Node master ESP32-WROOM, yang telah terhubung ke broker MQTT, berlangganan topik `home/surveillance/event` dan menunggu payload `"motion_detected"`.

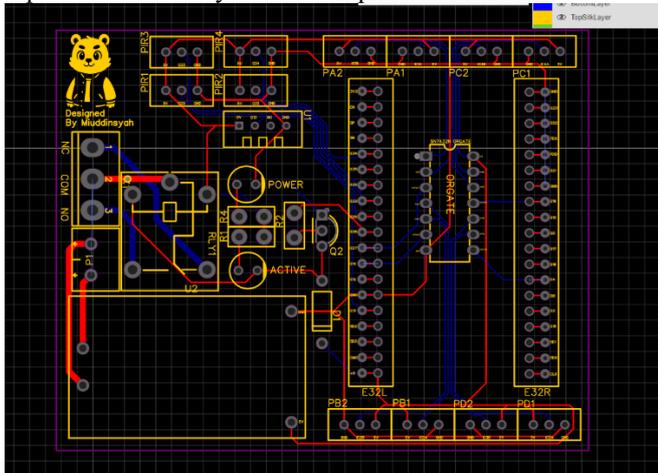


GAMBAR 1  
Schematic Jalur ESP32-WROOM

Pada GAMBAR 1 Master dengan terhubung 12 PIR HC-SR501 dan ORGATE SN7432N Dimana terdapat 4 masing masing Sensor PIR HC-SR501 yang dihubungkan langsung ke ESP32WROOM dan 4 Cluster Sensor Dimana masing masing cluster terdiri 2 PIR HC-SR501 yang dihubungkan ke 2 input ORGATE SN7432N dan output di hubungkan ke Master, Lalu terdapat DHT11 dan Relay yang terhubung master.

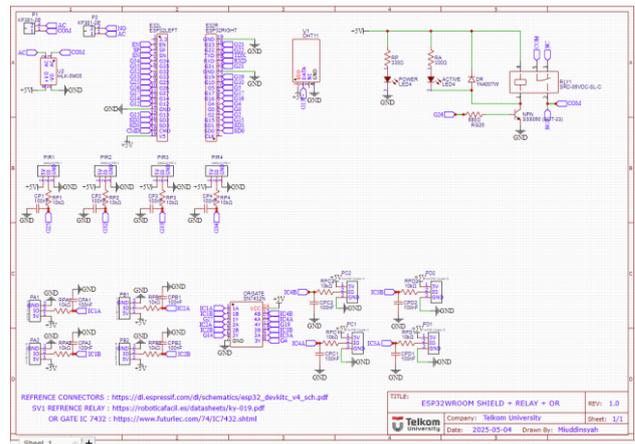
### B. Iterasi Desain PCB

Setelah prototipe breadboard terbukti fungsional, desain dipindahkan ke EasyEDA untuk pembuatan PCB.

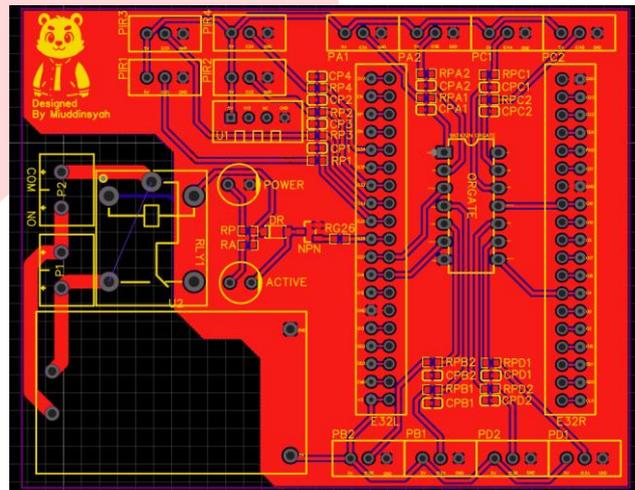


GAMBAR 2  
Footprint Jalur PCB

Pada GAMBAR 2 desain pertama, ground plane hanya terdiri dari jalur sempit dan jalur sinyal PIR langsung masuk ke GPIO Microcontroller tanpa filtering, sehingga sering muncul false-positive.



GAMBAR 3  
Schematic Jalur ESP32WROOM dengan Filter

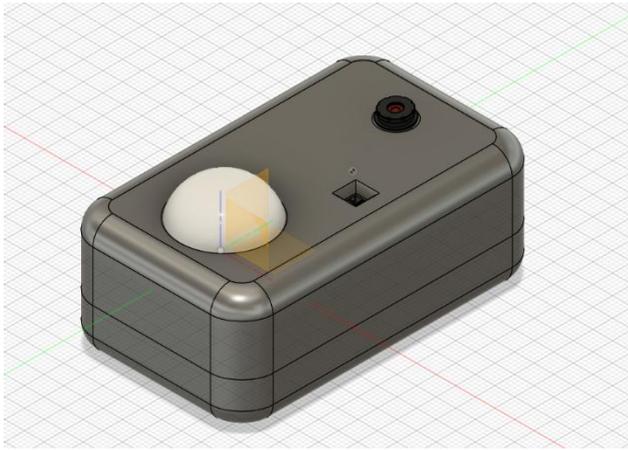


GAMBAR 4  
Footprint Jalur PCB dengan Filter

Dalam GAMBAR 3 dan GAMBAR 4 desain revisi diberikan Filter Dimana masing masing output Sensor diberi Resistor 10 kΩ serta kapasitor 100 nF, seluruh area PCB dipenuhi ground pour untuk menurunkan impedansi referensi dan menambahkan filter LC (Resistor 10 kΩ serta kapasitor 100 nF) pada jalur output PIR. Selain itu, kapasitor decoupling 100 nF guna menstabilkan suplai daya. Verifikasi dilakukan menggunakan multimeter untuk membandingkan voltase yang menghasilkan output HIGH PIR sebelum dan sesudah filter.

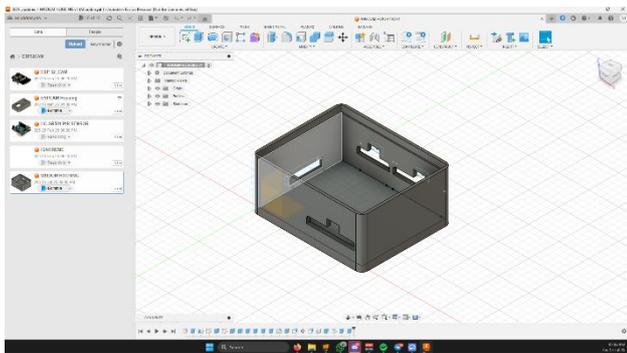
### C. Perancangan Enclosure 3D

Enclosure khusus dikembangkan di Autodesk Fusion 360 untuk melindungi modul dan memudahkan pemasangan.



GAMBAR 5  
Enclosure Slave (ESP32CAM)

Untuk mempertahankan kekakuan struktural mainboard dan PCB untuk ESP32CAM terhadap cuaca. Pada GAMBAR 5, Lubang untuk sensor PIR HC-SR501 dan Lensa OV2640 dilubangkan fit dengan toleransi lebih besar 0.2 mm Dimana membuat tahan cipratan air seperti hujan.



GAMBAR 6  
Enclosure Master (ESP32WROOM)

Untuk mempertahankan kekakuan struktural . diposisikan di sisi samping enclosure guna mencegah penumpukan panas selama operasi non-stop. Setelah desain pertama GAMBAR 6 menciptakan ruang yang terlalu longgar sehingga modul mudah bergeser.



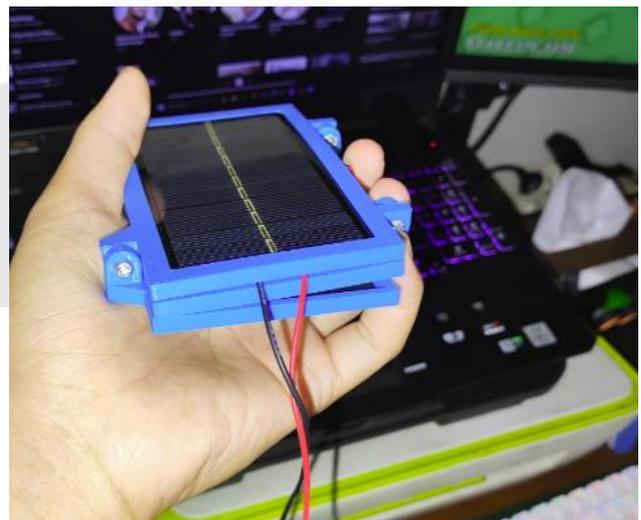
GAMBAR 7  
Enlousure Master Final

Pada Revisi mengecilkan dengan toleransi lebih 1mm dengan Dimensi PCB Master seperti di GAMBAR 7 memastikan posisi modul yang stabil. Prototipe awal dicetak dengan PLA untuk fit-check, lalu versi final dicetak ulang dengan PETG demi ketahanan suhu dan kelembapan.

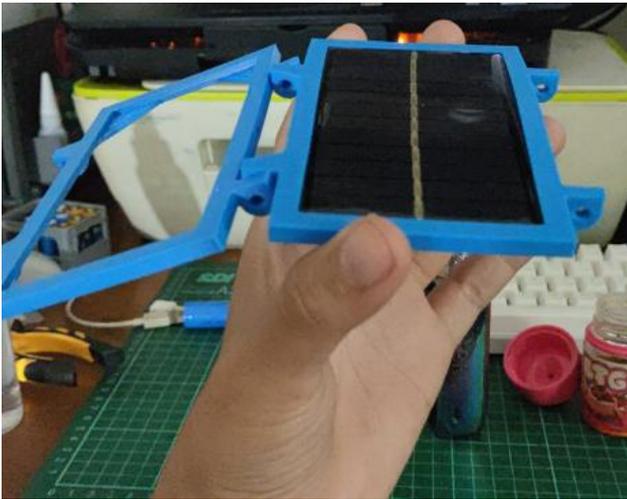


GAMBAR 8  
Desain Casing Panel Surya Lipat

GAMBAR 8 memperlihatkan desain casing modular untuk panel surya berukuran 6V 200mA yang dirancang menggunakan perangkat lunak OpenSCAD. Desain ini terdiri atas tiga buah frame panel yang saling terhubung melalui mekanisme engsel lipat. Setiap frame berfungsi sebagai wadah pelindung untuk satu panel surya dengan dimensi 68x37 mm, sekaligus memungkinkan konfigurasi lipat agar lebih mudah disesuaikan terhadap arah datang cahaya matahari. Selain memberikan perlindungan fisik terhadap panel surya, desain ini juga mengutamakan portabilitas dan fleksibilitas orientasi, sehingga ideal untuk aplikasi IoT portabel di luar ruangan. Casing ini dirancang untuk dicetak menggunakan printer 3D dengan material PETG yang tahan terhadap paparan sinar matahari langsung dan cukup kuat untuk penggunaan di lingkungan luar ruangan. Desain ini merupakan bagian penting dari sistem daya mandiri berbasis panel surya yang digunakan dalam penelitian.



GAMBAR 9  
Fisik dari prototipe solar panel lipat

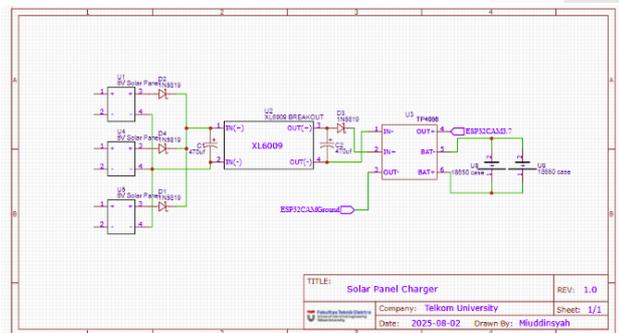


GAMBAR 10  
Fisik Solar Panel Lipat

GAMBAR 9 dan GAMBAR 10 menunjukkan bentuk fisik dari prototipe solar panel lipat yang telah dirakit menggunakan tiga buah panel surya 6V 200mA yang dipasang secara paralel. Panel-panel ini dipasang ke dalam casing 3D print berbahan PLA berwarna biru, yang dirancang khusus agar dapat dilipat untuk memudahkan penyimpanan dan mobilitas. Tiap bagian casing dilengkapi dengan engsel yang memungkinkan unit panel dibuka dan diarahkan mengikuti arah datangnya sinar matahari. Desain ini juga memberikan perlindungan mekanis terhadap panel dan kabel sambungan, sekaligus menjaga sudut optimal pencahayaan. Kabel power keluar dari bagian bawah sistem, dan langsung menuju ke modul pengatur daya seperti buck converter dan TP4056 untuk proses pengisian baterai lithium. Prototipe ini telah digunakan dalam pengujian performa sistem daya mandiri berbasis tenaga surya.

#### D. Skematik Rangkaian Sistem Daya Panel Surya

Skematik terdiri dari tiga buah panel surya 6V 200mA yang disusun secara paralel, sehingga total arus output meningkat tanpa mengubah tegangan kerja. Setiap panel dilindungi dengan dioda Schottky 1N5819 guna mencegah arus balik ke panel saat intensitas cahaya berkurang. Tegangan gabungan dari panel-panel tersebut distabilkan oleh kapasitor elektrolit 470 $\mu$ F sebelum masuk ke modul XL6009, sebuah konverter buck-boost yang menyesuaikan tegangan agar sesuai dengan kebutuhan modul pengisi daya.

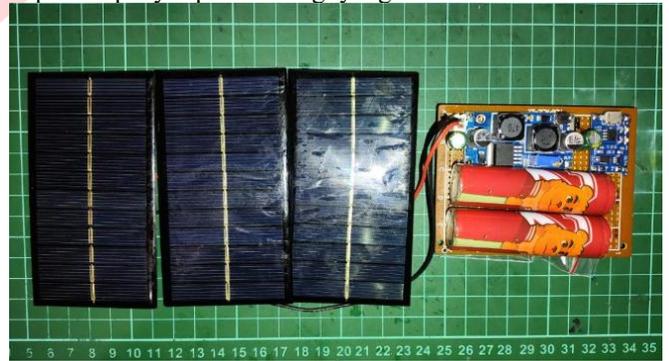


GAMBAR 11  
Schematic Charging Module Solar Panel

Gambar 9 menunjukkan skematik sistem pengisian daya berbasis panel surya yang dirancang untuk menyuplai energi secara mandiri kepada sistem ESP32-CAM. Dalam rancangan ini digunakan tiga buah panel surya bertegangan nominal 6V dan arus maksimum 200mA yang dihubungkan secara paralel untuk meningkatkan total arus output. Masing-masing panel dilengkapi dengan dioda Schottky 1N5819 guna mencegah arus balik yang dapat menyebabkan kerusakan pada panel surya.

Tegangan hasil kombinasi panel kemudian disaring dan distabilkan menggunakan kapasitor elektrolit 470 $\mu$ F sebelum diteruskan ke modul konversi tegangan XL6009. Modul XL6009 berfungsi sebagai buck-boost converter, menyesuaikan tegangan input dari panel surya agar sesuai dengan kebutuhan pengisian baterai.

Output dari XL6009 juga dilengkapi dengan kapasitor tambahan untuk meredam lonjakan tegangan serta dioda pelindung sebelum masuk ke modul TP4056. Modul TP4056 ini digunakan untuk mengatur proses pengisian dua buah baterai 18650 yang dirangkai paralel, sehingga memberikan kapasitas penyimpanan energi yang lebih besar.



GAMBAR 12  
Solar Charger

Selain mengatur arus pengisian, TP4056 juga menyediakan proteksi overcharge dan overdischarge pada baterai. Energi yang tersimpan kemudian disalurkan ke mikrokontroler ESP32-CAM sebagai sumber daya utama. Skematik ini menggambarkan keseluruhan sistem daya mandiri berbasis energi surya yang hemat energi, portabel, dan ideal untuk pengaplikasian di luar ruangan secara terus menerus.

#### E. Implementasi Firmware dan Mekanisme Telegram

Seluruh firmware dikembangkan di PlatformIO dengan modul-modul terpisah untuk koneksi Wi-Fi, MQTT, interrupt PIR, dan Telegram. Koneksi Wi-Fi diatur secara otomatis melalui WiFiManager, sedangkan PubSubClient mengelola komunikasi dengan broker MQTT. Fungsi interrupt onPIRTriggered() mencatat waktu deteksi dan mengatur flag untuk mengambil gambar. Setelah event dipublish pada topik MQTT, callback pada node master memanggil fungsi fetchAndSendPhoto(), yang melakukan HTTP GET ke ESP32-CAM untuk memperoleh buffer JPEG dan kemudian memanggil bot.sendPhotoByBinary("me", "image/jpeg", len, jpg\_buf) dari library UniversalTelegramBot. Mekanisme retry diimplementasikan untuk memeriksa keberhasilan

pengiriman hingga tiga kali, dengan jeda dua detik antara upaya, guna menjamin reliabilitas pesan.

#### F. Analisis Filter LC pada Jalur PIR

Untuk meredam komponen noise frekuensi tinggi pada output PIR, kita menambahkan Resistor  $R = 10 \text{ k}\Omega$  dan kapasitor  $C = 100 \text{ nF}$  seperti pada skema berikut :

$$\text{Pir Output} - L - \text{MCU}, C \rightarrow \text{Ground} \quad (1)$$

Frekuensi cut-off dari low-pass LC filter ini dapat dihitung dengan:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2)$$

Dimana apabila  $R=10 \text{ k}\Omega$  dan Kapasitor sebesar  $C=100 \text{ nF}=0,1 \mu\text{F}$  maka

$$= \frac{1}{2\pi \times 10\,000 \Omega \times 100 \times 10^{-9} \text{ F}} \quad (3)$$

$$\approx 159.2 \text{ Hz} \quad (4)$$

Artinya sinyal di atas 159 kHz akan teredam  $\geq 3 \text{ dB}$ , sehingga sebagian besar noise switching (biasanya di ratusan kHz hingga MHz) dapat dipotong. besar atenuasi (magnitudo transfer function) pada frekuensi noise ketika  $(\omega_n RC \gg 1)$  dapat diekspresikan sebagai:

$$|H(j\omega_n)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_n RC)^2}} \approx \frac{1}{\omega_n RC} \quad (5)$$

$= (\omega_n RC \gg 1)$

Pada  $f_n = 100 \text{ kHz}$  dimana  $\omega_n = 2\pi f_n = 2\pi \times 10^5 \text{ rad/s}$

$$\omega_n RC = 2\pi \times 10^5 \times 10^4 \times 100 \times 10^{-9} \approx 628.3 \quad (8)$$

$$|H(j\omega_n)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_n RC)^2}} \approx \frac{1}{\omega_n RC} \approx 0.0016 \quad (9)$$

hanya  $\sim 0.16 \%$  amplitudo noise yang lolos penurunan  $>600$  Kali.

#### G. Metodologi Pengujian Sistem Daya Panel Surya

Pengujian sistem daya panel surya dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas rangkaian dalam menyuplai daya ke sistem secara mandiri, khususnya ESP32-CAM.

Rangkaian terdiri atas 3 buah panel surya 6V 200mA yang dirangkai paralel dengan masing-masing menggunakan dioda Schottky 1N5819. Output dari panel kemudian dimasukkan ke modul step-up XL6009, dan hasil konversi tegangan disuplai ke modul TP4056 untuk mengisi dua buah baterai 18650 secara paralel.

### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Temuan utama penelitian, di mana telah dikembangkan sistem pengawasan perumahan otomatis yang memanfaatkan ESP32-CAM untuk akuisisi citra, pemrosesan objek berbasis YOLOv8n pada cloud server, serta notifikasi real-time lewat Telegram bot. Hasil pengujian menunjukkan bahwa platform

ini mampu menangkap dan mengirimkan gambar dengan rata-rata latensi end-to-end sebesar 1,23 s ( $\sigma = 0,08 \text{ s}$ ), mempertahankan tingkat deteksi gerakan autentik hingga 98 %, serta menurunkan false-positive rate dari 30 % (desain PCB awal) menjadi hanya 2 % setelah optimasi ground pour dan penerapan LC-filter. Selain itu, kestabilan koneksi diuji selama 48 jam nonstop dengan hanya dua kali reconnect dan penggunaan memori terjaga pada  $40 \% \pm 2 \%$ . Pengujian mekanik memperlihatkan enclosure PETG mempertahankan  $\Delta T \leq 5 \text{ }^\circ\text{C}$  di lingkungan outdoor satu minggu penuh tanpa deformasi.

Selanjutnya, Pengujian difokuskan pada evaluasi latensi end-to-end, akurasi deteksi PIR, serta kestabilan koneksi dan mekanik.

#### A. Latensi End-to-End

Pengukuran delay dari interrupt PIR hingga foto tampil di Telegram dilakukan sebanyak 20 kali. Hasil menunjukkan rata-rata delay  $1,23 T_{avg} = 1,23 \text{ s}$  dengan deviasi standar  $\sigma = 0,08 \text{ s}$  yang konsisten dengan estimasi matematis. Distribusi delay yang rapat memperlihatkan kestabilan alur MQTT  $\rightarrow$  HTTP  $\rightarrow$  Telegram meski terdapat fluktuasi bandwidth.

#### B. Akurasi dan False-Positive Rate

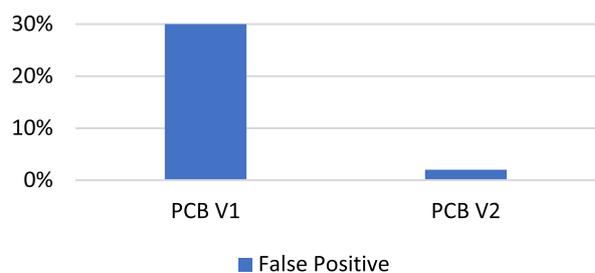
Akurasi deteksi PIR diuji pada 100 skenario gerakan di kondisi minim cahaya ( $<5 \text{ lx}$ ). Sistem berhasil mendeteksi 98 event valid sehingga tingkat false-positive rate (FP) turun drastis dari 30 % (desain PCB awal tanpa ground pour & LC-filter) menjadi 2 % setelah optimasi.

Tabel 1  
Hasil deteksi PIR sebelum dan sesudah optimasi filter

Skenario	Total Percobaan	True Positives	False Positives	FP Rate (%)
Sebelum Filter (PCB v1)	100	70	30	30
Sesudah Filter (PCB v2)	100	98	2	2

Tabel 2  
Ringkasan hasil FP rate dan delay

	Nilai
FP Rate Sebelum Filter (PCB v1)	30%
FP Rate Sesudah Filter (PCB v2)	2%
Rata-rata Delay End-to-End	1,23 s



Grafik 1  
FP rate Masing Masing PCB

### C. Kestabilan Koneksi

Pengujian 48 jam nonstop mencatat hanya 2 kali reconnect ke broker MQTT dan penggunaan memori heap stabil di kisaran  $40\% \pm 2\%$ , menegaskan efektivitas strategi retry eksponensial dan manajemen sumber daya pada ESP32-WROOM.

### D. Hasil Pengujian Sistem Daya Panel Surya

Pada pengujian sistem daya menggunakan tiga buah panel surya 6V 200mA dan modul konversi XL6009, ditemukan anomali saat tegangan input menurun di bawah 3.7V akibat pencahayaan redup. XL6009 yang seharusnya menaikkan tegangan ke 5V justru menghasilkan lonjakan hingga >20V. Hal ini sangat berisiko terhadap modul TP4056 yang hanya mendukung input maksimal 8V.

Pengujian ini dilakukan dalam dua kondisi: tanpa beban dan dengan beban (TP4056 dan baterai). Tanpa beban, spike sangat signifikan. Dengan beban, tegangan spike sedikit tertahan namun masih berbahaya. Hal ini menunjukkan bahwa buck-boost converter tidak cocok digunakan untuk sumber daya tak stabil seperti panel surya kecil.

### E. Analisis Sistem Daya dan Solusi Perbaikan

Berdasarkan pengujian, diketahui bahwa XL6009 yang merupakan buck-boost converter tidak mampu menjaga kestabilan output pada input rendah. Hal ini karena switching internal XL6009 kehilangan referensi saat input mendekati ambang minimum operasional.

Solusi awal seperti penambahan TVS diode P6KE6.8A dan kapasitor elektrolit 470 $\mu$ F pada input dan output XL6009 hanya memberikan perlindungan parsial. Namun, tetap tidak dapat mencegah terjadinya spike sepenuhnya.

Maka, solusi akhir yang diterapkan adalah mengganti boost buck converter dengan buck converter Mini560 Versi Output 5 Volt, yang jauh lebih stabil dan tidak menghasilkan spike karena tidak meningkatkan tegangan melainkan hanya menurunkan dari input yang lebih tinggi (misalnya panel surya 12V 2W).

Dengan penggunaan buck converter, output stabil di 5V bahkan saat cahaya panel tidak maksimal, dan proses pengisian TP4056 berjalan aman dan efisien.

### F. Evaluasi Mekanik

Enclosure PETG diuji di lingkungan outdoor selama satu minggu. Suhu ambient 30 °C dan suhu internal 35°C ( $\Delta T \approx 5$  °C) sesuai model termal, tanpa deformasi fisik. Desain ventilasi dan snap-fit bracket terbukti memelihara posisi modul dan mencegah overheating.

## V. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem pengawasan perumahan otomatis berbasis IoT dan komputasi awan, dengan memanfaatkan modul ESP32-CAM dan sensor PIR di sisi edge untuk akuisisi gambar, serta penerapan filter LC dan

ground pour pada PCB untuk meminimalkan noise sinyal. Gambar hasil tangkapan dikirim ke server cloud untuk inferensi objek menggunakan model YOLOv8n, dan hasil deteksi disampaikan secara real-time melalui bot Telegram.

Berdasarkan pengujian end-to-end, rata-rata latensi sistem tercatat sebesar 1,23 detik ( $\sigma = 0,08$  s), yang masih mendukung kebutuhan respons real-time. Akurasi deteksi PIR mengalami peningkatan signifikan, dengan true positive rate naik dari 70% menjadi 98% dan false positive rate turun dari 30% menjadi 2% setelah optimalisasi perangkat keras. Stabilitas koneksi jaringan terjaga selama 48 jam pengujian nonstop, dengan hanya dua kali reconnect, dan penggunaan memori heap stabil di kisaran  $40\% \pm 2\%$ . Enclosure berbahan PETG terbukti mampu mempertahankan selisih suhu internal-eksternal di bawah  $\Delta T \leq 5$  °C pada lingkungan outdoor tanpa deformasi.

Sebagai pengembangan, sistem ini juga berhasil diintegrasikan dengan sistem daya berbasis panel surya. Uji coba menggunakan tiga panel surya 6V 200mA dan konverter XL6009 menunjukkan adanya lonjakan tegangan (spike) berbahaya saat tegangan input turun di bawah 3.7V. Untuk mengatasi hal tersebut, solusi akhir yang diterapkan adalah mengganti buck-boost converter dengan buck converter yang lebih stabil, serta menambahkan proteksi berupa diode Schottky, kapasitor. Sistem ini memungkinkan ESP32-CAM dan modul TP4056 tetap mendapat suplai daya stabil dari baterai lithium 18650, serta memperpanjang durasi operasi sistem di lapangan tanpa ketergantungan listrik eksternal.

Dengan membebaskan prosesor edge dari beban inferensi berat dan menyediakan sumber daya mandiri, sistem ini memadukan kecepatan, akurasi deteksi, efisiensi energi, dan ketahanan mekanik dalam satu kesatuan yang komprehensif. Pendekatan ini terbukti efektif dalam meningkatkan keamanan perumahan, dan membuka peluang pengembangan lebih lanjut seperti integrasi multi-kamera, deteksi wajah, deep-sleep untuk penghematan daya, serta penerapan enkripsi end-to-end guna menjaga privasi dan keamanan data.

## VI. REFERENSI

- [1] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "The Internet of Things: A survey," *Comput. Networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.comnet.2010.05.010.
- [2] Espressif Systems, "{esp32-camera} v2.1.0," 2021. [Online]. Available: <https://components.espressif.com/components/espressif/esp32-camera>
- [3] MPJA, "HC-SR501 PIR Motion Detector data sheet," Oct. 2013. [Online]. Available: <https://www.mpja.com/download/31227sc.pdf>
- [4] OASIS Open, "MQTT Version 3.1.1," 2014. [Online]. Available: <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html>
- [5] Telegram, "Telegram Bot API," 2025. [Online]. Available: <https://core.telegram.org/bots/api>

[6] PlatformIO, "PlatformIO Home — PlatformIO," 2025. [Online]. Available: <https://docs.platformio.org/en/latest/home/index.html>

[7] Autodesk, "Autodesk Fusion 360 Overview," 2025. [Online]. Available: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>

[8] EasyEDA, "EasyEDA - Online PCB design & circuit simulator," 2013. [Online]. Available: <https://easyeda.com/>

[9] Ultralytics, "Explore Ultralytics YOLOv8," 2023. [Online]. Available: <https://docs.ultralytics.com/models/yolov8/>

