

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Justifikasi Solusi

2.1.1 Penggunaan Sensor Inframerah (Balla et al. 2020)

Balla et al. (2020) mengembangkan sistem sensor inframerah gelang opto-elektronik (IRSR) menggunakan fotodioda untuk mendeteksi arthropoda berukuran 0,1-35 mm. Sistem terdiri dari dua varian: IRSR-1 (tabung 35 mm untuk makroinvertebrata 2-35 mm) dan IRSR-2 (tabung 10 mm untuk mikroarthropoda 0,1-2 mm) dengan 16 fotodioda dalam susunan semicircular yang dipasangkan dengan dua LED inframerah. Algoritma deteksi menggunakan baseline dinamis dengan laju pengambilan sampel 3,2 kHz, dan sensor memicu deteksi ketika sinyal melebihi ambang yang dapat disesuaikan (parameter ST). Sistem berjalan pada baterai lithium-ion 3,6V (5,5-6 mA) dengan operasi lapangan otonom selama 2 minggu hingga 1 bulan, dilengkapi dengan corong presisi untuk mencegah penghitungan ganda.

Pengujian laboratorium menggunakan tiga protokol: penjatuhan partikel butir yang dikalibrasi, arthropoda mati, dan mikroarthropoda hidup yang bergerak realistik. IRSR-1 mencapai detektabilitas 95% pada diameter 0,9 mm dengan akurasi 100% untuk makroinvertebrata 1,4-24 mm, sementara IRSR-2 lebih sensitif pada 0,6 mm untuk partikel butir. Pengujian dengan 430 spesimen mikroarthropoda hidup menunjukkan detektabilitas 95% pada 1,1 mm untuk *F. candida*, 0,9 mm untuk *H. nitidus*, dan 0,5 mm untuk *H. aculeifer* (pada ambang ST=40). Ambang sensitivitas lebih rendah (ST=40) mendeteksi individu kecil lebih efektif tetapi meningkatkan positif palsu dari kebisingan lingkungan.

Teknologi IRSR dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan pemantauan arthropoda konvensional yang memerlukan inspeksi manual dan identifikasi laboratorium—proses yang lambat untuk pengambilan

keputusan manajemen hama cepat. Pengukuran real-time memungkinkan penerusan data otomatis ke server jarak jauh, mengubah perangkap pasif menjadi instrumen pemantauan aktif. Integrasi dengan kamera meningkatkan identifikasi spesimen sambil mengurangi konsumsi energi dibandingkan perekaman video berkelanjutan, dengan akurasi lapangan 73-100% tergantung pada spesies. Desain modular memungkinkan pembersihan mudah dan segel karet tahan air, sementara ambang sensitivitas lebih tinggi ($ST=100$) lebih andal dalam kondisi kebisingan lingkungan tinggi [25].

Justifikasi untuk Desain Sistem Usulan :

Inframerah dipilih karena memberikan deteksi non-kontak berkelanjutan untuk arthropoda 0,1-35 mm dengan akurasi 73-100%, sambil meminimalkan interferensi cahaya lingkungan terlihat. Spektral decoupling memungkinkan sensor mengisolasi bayangan arthropoda dari variasi cahaya latar yang disebabkan cuaca, gerakan kanopi, atau siklus harian—kebisingan yang mengorbankan sistem fotoelektrik cahaya terlihat. Fotodioda BPV10NF menciptakan zona deteksi sempit dengan resolusi spasial tinggi untuk membedakan arthropoda target dari sampah non-target berdasarkan profil sinyal. Keluaran tegangan proporsional memberikan informasi ukuran bawaan, memungkinkan penyesuaian ambang adaptif tanpa modifikasi perangkat keras.

2.1.2 Analisis Perilaku Serangga pada Sistem Beam-Break (Nguyen et al., 2025)

Penelitian terbaru oleh Nguyen et al. (2025) berjudul "*Towards fruit fly automatic counting: Electronic trap design and long-term feature data acquisition*" menyoroti tantangan perilaku biologis dalam sensor elektronik. Meskipun sistem mereka mampu mencapai akurasi 90,72% dalam kondisi terkontrol, penelitian ini menggarisbawahi kelemahan fundamental sensor *beam-break*: ketidakmampuan membedakan antara lalat baru yang masuk dengan lalat yang sama yang "berdiam diri" (*loitering*) atau bergerak bolak-balik di area sensor. Perilaku anomali ini sering kali menyebabkan *double counting* atau kegagalan deteksi jika lalat menutupi sensor dalam waktu lama.

Masalah mendasar yang diidentifikasi adalah karakteristik sinyal yang dihasilkan oleh lalat yang ragu-ragu saat memasuki perangkap. Dalam skenario nyata, lalat buah tidak selalu melintasi sensor dengan kecepatan konstan; mereka sering kali hinggap di tepi sensor atau mengepakkan sayap tepat di jalur sinar inframerah. Modulasi sinyal frekuensi tinggi yang dihasilkan oleh kepakan sayap, atau oklusi parsial yang berkepanjangan saat lalat diam, menghasilkan pola gelombang yang kompleks. Algoritma penghitungan sederhana yang hanya mengandalkan deteksi tepi sinyal (*edge detection*) akan membaca fenomena ini sebagai rentetan objek yang berbeda, menyebabkan inflasi data yang parah.

Lebih jauh, Nguyen et al. mencatat bahwa akurasi deteksi sangat bergantung pada pemisahan yang jelas antara objek dan latar belakang (*background*). Dalam konteks perangkap lalat buah, tubuh lalat yang kecil dan semi-transparan tidak selalu memblokir sinar inframerah sepenuhnya, menghasilkan perubahan amplitudo sinyal yang sangat tipis (*low modulation depth*). Tanpa mekanisme yang mampu "mengunci" kondisi latar belakang saat terjadi gangguan, sistem akan kesulitan menentukan kapan tepatnya peristiwa deteksi dimulai dan berakhir, terutama jika

gangguan tersebut berlangsung lebih lama dari konstanta waktu filter rata-rata yang digunakan[26].

Justifikasi untuk Desain Sistem Usulan

Kelemahan akibat perilaku loitering ini menjustifikasi penerapan logika deteksi berbasis histeresis dengan mekanisme baseline freezing. Konsep ini bekerja dengan "membekukan" nilai referensi lingkungan segera setelah gangguan terdeteksi, mencegah sistem mengkalibrasi ulang dirinya terhadap keberadaan lalat yang sedang diam. Validasi penghitungan hanya dilakukan setelah sinyal sensor terkonfirmasi kembali ke level baseline awal dengan toleransi tertentu (*return-to-baseline*). Pendekatan ini secara teoritis mengeliminasi penghitungan ganda yang disebabkan oleh mikro gerakan sayap atau keraguan serangga saat memasuki area sensor.

2.1.3 Efisiensi Biaya Tenaga Kerja dan Resolusi Temporal (Al-Zarboubi et al., 2024)

Dalam studi terbaru berjudul "*IoT-Based Pest Detection in Agriculture for Precision Farming*", Al-Zarboubi et al. (2024) menyoroti inefisiensi fundamental dalam metode pemantauan hama konvensional. Penelitian ini mengidentifikasi bahwa ketergantungan pada inspeksi manual memiliki dua kelemahan fatal: biaya operasional yang tinggi akibat kebutuhan tenaga kerja terampil, dan rendahnya "resolusi temporal" data yang diperoleh.

Secara spesifik, Al-Zarboubi et al. mencatat bahwa metode manual sering kali mengabaikan fluktuasi populasi hama yang sebenarnya (actual pest population levels) karena jeda waktu antar inspeksi yang biasanya dilakukan secara mingguan. Hal ini menyebabkan fenomena "keterlambatan respons", di mana lonjakan populasi hama sering kali baru terdeteksi setelah kerusakan terjadi. Studi ini menyimpulkan bahwa transisi ke sistem otomatis memberikan keuntungan ekonomi langsung

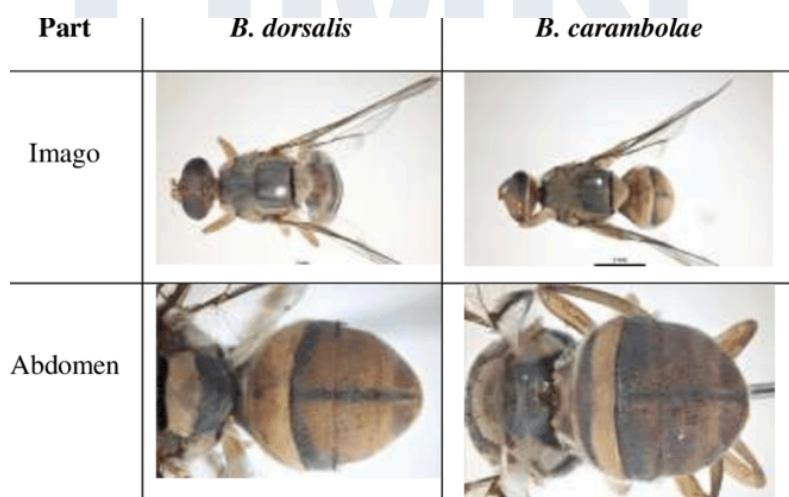
melalui penghematan biaya tenaga kerja (*optimized labor use*) dan penghapusan human error dalam proses penghitungan yang repetitif[27].

Justifikasi untuk Desain Operasional Sistem: Analisis ekonomi dari Al-Zarboubi et al. ini menjustifikasi urgensi peralihan dari metode penghitungan fisik ke metode telemetri digital yang diusulkan dalam penelitian ini.

2.2 Tinjauan Teori

2.2.1 Lalat buah

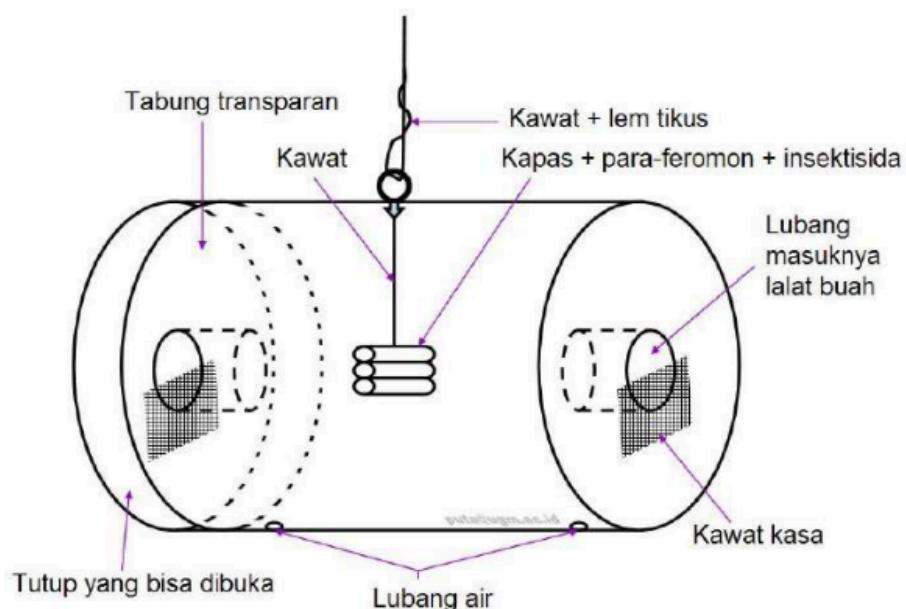
Lalat buah (Ordo: Diptera, Famili: Tephritidae) merupakan salah satu kelompok hama yang paling merusak secara ekonomi di sektor pertanian global. Salah satu spesies yang paling menjadi perhatian adalah lalat buah oriental (*Bactrocera dorsalis*) dan *B. Carambolae*, yang dikenal sangat invasif dan merugikan [10]. Kerusakan utama disebabkan oleh lalat betina yang meletakkan telurnya di bawah kulit buah. Larva yang menetas kemudian akan memakan daging buah dari dalam, menyebabkan pembusukan internal dan membuat buah tidak dapat dipasarkan [10]. Karakteristik biologis lalat buah yang membuatnya sangat berbahaya antara lain adalah sifatnya yang polifag (mampu menyerang berbagai jenis tanaman inang), memiliki daya sebar yang tinggi, dan tingkat reproduksi yang cepat [10].



Gambar 2.2.1 Bactrocera Dorsalis dan Carambolae

Status Bactrocera dorsalis sebagai hama karantina memiliki implikasi serius terhadap perdagangan internasional [10]. Kehadiran spesies ini di suatu wilayah dapat secara langsung memicu pembatasan atau penolakan impor dari negara-negara mitra dagang yang berstatus bebas hama. Oleh karena itu, opsi manajemen untuk mengendalikan lalat buah seringkali bersifat komprehensif dan terintegrasi, yang tidak hanya berfokus pada pengendalian di tingkat kebun tetapi juga pada skala regional. Strategi manajemen ini mencakup surveilans berkelanjutan melalui pemasangan perangkap, penerapan protokol karantina yang ketat, serta teknik pengendalian lain seperti *Sterile Insect Technique* (SIT) atau penggunaan semprotan umpan (*bait sprays*) untuk mempertahankan status area dengan prevalensi hama yang rendah dan memenuhi persyaratan ekspor [10].

2.2.2 Perangkap Steiner



Gambar 2.2.2 Perangkap Steiner. Suputa et al. (2007).
(Pedoman Koleksi dan Preservasi Lalat Buah.)

Perangkap Steiner terdiri dari beberapa komponen struktural yang terintegrasi untuk fungsi optimal penangkapan lalat buah. Atrakton (*pheromone*) seperti Methyl Eugenol, Trimedlure, atau Cuellure ditempatkan pada kapas yang tersuspensi di bagian tengah tabung untuk melepaskan volatile compounds secara terkontrol. Untuk memaksimalkan efektivitas penangkapan, kepala perangkap dilengkapi dengan kombinasi insektisida dengan perbandingan 1 bagian insektisida dan 4 bagian paraferomon, sehingga lalat yang masuk akan terpapar dan mencegah kemungkinan lalat melarikan diri setelah memasuki perangkap. Di bagian bawah perangkap terdapat lubang air (*water reservoir*) yang berfungsi sebagai area penampungan dan sekaligus menjebak lalat yang telah terpapar insektisida, memastikan seluruh populasi yang tertangkap tetap terakumulasi dengan aman untuk perhitungan kuantitatif yang akurat. Desain ini dilengkapi pula dengan tutup yang dapat dibuka (*removable cap*) pada bagian atas untuk memudahkan inspeksi berkala dan pengumpulan data pemantauan tanpa mengganggu kontinuitas fungsi perangkap di lapangan[23].

Perangkap Steiner klasik memiliki bentuk tabung horizontal yang terbuat dari plastik transparan dengan diameter sekitar 10-13 cm dan panjang 12-14,5 cm. Desain transparan ini memungkinkan cahaya masuk ke dalam perangkap, yang secara teoritis memberikan ilusi jalur terbuka (*open passage*) bagi lalat buah yang tertarik, sehingga meningkatkan tingkat masuknya serangga target ke dalam perangkap. Kedua ujung tabung dilengkapi dengan bukaan masuk (*entry holes* atau *ingress tubes*) yang memungkinkan lalat buah memasuki interior perangkap setelah tertarik oleh atraktan yang digantung di bagian tengah[22].

2.2.3 Methyl Eugenol



Gambar 2.2 2 Perangkap dengan bait Methyl Eugenol

Metode konvensional untuk memantau populasi lalat buah umumnya mengandalkan penggunaan perangkap sebagai alat utama dalam program Pengendalian Hama Terpadu (PHT). Perangkap ini bekerja dengan menggunakan atraktan kimia untuk menarik serangga target. Salah satu atraktan yang paling efektif dan umum digunakan adalah Methyl Eugenol (ME), sebuah senyawa para-feromon yang sangat kuat dalam menarik lalat buah jantan dari spesies tertentu, terutama dari genus *Bactrocera*. Perangkap yang berisi ME digunakan untuk tiga tujuan utama: pemantauan (untuk mengumpulkan data FTD), deteksi dini (untuk mengetahui keberadaan spesies invasif baru di suatu area), dan pengendalian (melalui teknik mass trapping atau penangkapan massal untuk menekan populasi hama).

Meskipun sangat efektif dalam menangkap lalat buah, keterbatasan utama dari sistem perangkap tradisional terletak pada ketergantungannya yang mutlak pada intervensi manusia untuk pengumpulan data [4]. Setiap siklus pemantauan memerlukan kunjungan lapangan secara periodik oleh petugas untuk memeriksa setiap perangkap satu per satu, menghitung jumlah lalat yang tertangkap secara manual, dan mencatat data sebelum dikirim untuk dianalisis lebih lanjut [4, 5]. Proses ini secara inheren bersifat padat karya dan dapat menimbulkan biaya operasional yang signifikan, terutama ketika diterapkan dalam program surveilans skala besar yang mencakup wilayah geografis yang luas [6]. Selain itu, terdapat jeda waktu (time-lag) antara saat lalat terperangkap dengan saat data

tersedia, yang dapat menunda respons cepat yang diperlukan selama fase awal wabah hama [5, 6].

2.2.4 FTD

Dalam konteks perdagangan internasional produk hortikultura, pemenuhan standar fitosanitari adalah syarat mutlak. Salah satu parameter kunci yang digunakan secara global untuk pemantauan populasi lalat buah adalah indeks FTD (*Flies per Trap per Day*) [7]. Indeks ini merupakan ukuran standar yang digunakan untuk mengkuantifikasi tingkat populasi hama di suatu area dalam periode waktu tertentu. Menurut panduan dari lembaga internasional seperti IAEA, data FTD yang akurat dan terkini sangat krusial untuk menetapkan dan mempertahankan status suatu wilayah sebagai "area bebas hama" atau "area dengan tingkat prevalensi hama yang rendah" [7]. Status ini menjadi dasar bagi otoritas karantina negara pengimpor dalam mengambil keputusan untuk menerima atau menolak suatu komoditas, sehingga data FTD yang andal adalah jaminan penting untuk kelancaran akses pasar ekspor [7].

Lebih dari sekadar metrik teknis, FTD memainkan peran sentral dalam kerangka kerja Pengendalian Hama Terpadu (PHT) dan diplomasi perdagangan internasional [10]. Data FTD yang dikumpulkan secara sistematis dan ilmiah merupakan bukti empiris yang digunakan oleh Organisasi Perlindungan Tanaman Nasional (*National Plant Protection Organization - NPPO*) untuk menetapkan dan mempertahankan "status hama" suatu wilayah [10]. Status ini, yang didukung oleh data surveilans yang kuat, menjadi dasar justifikasi teknis suatu negara dalam bernegosiasi dengan negara mitra dagang dan untuk menunjukkan kepatuhan terhadap perjanjian internasional seperti Perjanjian SPS (Sanitary and Phytosanitary) di bawah Organisasi Perdagangan Dunia (WTO) [7]. Dengan demikian, integritas dan keandalan data FTD memiliki dampak langsung terhadap akses pasar dan ekonomi ekspor produk pertanian suatu negara [7].

2.2.5 IR Breaker

Sistem pemutus berkas cahaya (beam-break) berbasis inframerah merupakan sebuah metode deteksi optik yang fundamental dalam aplikasi penginderaan gerakan dan penghitungan objek. Konsep dasar dari sistem ini melibatkan pasangan komponen optoelektronik: sebuah pemancar inframerah (infrared emitter) dan sebuah penerima inframerah (infrared receiver) yang diposisikan saling berhadapan. Dalam kondisi normal, penerima inframerah terus menerus menerima iradiasi dari pemancar, menghasilkan keluaran sinyal yang stabil. Ketika sebuah objek fisik melintasi jalur cahaya inframerah antara kedua komponen tersebut, berkas cahaya mengalami oklusi, sehingga penurunan intensitas cahaya menjadi indikator terjadinya peristiwa deteksi [12].

Keunggulan utama penggunaan radiasi inframerah dalam konteks pemantauan organisme hidup adalah karakteristik invisibilitasnya terhadap sistem penglihatan serangga target. Studi elektrofisiologi pada fotoreseptor *Drosophila melanogaster* menunjukkan bahwa sensitivitas spektral fotoreseptor didominasi oleh respons terhadap cahaya ultraviolet (330-355 nm) hingga merah (600 nm), dengan sensitivitas yang memudar tajam melampaui 650 nm. Penelitian lebih lanjut pada *Bactrocera* (lalat buah oriental) mengkonfirmasi bahwa rentang visual serangga ini terbatas pada panjang gelombang 300-650 nm. Dengan demikian, radiasi inframerah pada spektrum dekat (sekitar 940 nm) berada jauh di luar jangkauan kemampuan visual serangga target, menjadikannya "stealth" atau tersembunyi dari perspektif biologis, sehingga tidak memicu respons fototaksis yang dapat mengubah perilaku alami organisme target. Linearitas respons fotodioda memungkinkan sistem untuk mendeteksi modulasi sinyal yang sangat halus (misalnya 5-10%), sebuah kemampuan yang sangat penting dalam penginderaan objek berukuran kecil atau yang tidak sepenuhnya opak terhadap radiasi inframerah [13,14].

2.2.6 Modulasi Lebar Pulsa (Pulse Width Modulation) pada LED

Salah satu tantangan utama dalam desain node sensor nirkabel mandiri adalah konsumsi daya komponen aktif. Pada sistem optik konvensional, LED inframerah dioperasikan dalam mode gelombang kontinu (Continuous Wave), yang menarik arus bias maju (forward current) secara konstan. Mengingat LED adalah beban resistif yang signifikan, mode operasi ini sangat tidak efisien untuk aplikasi bertenaga baterai surya. Untuk memitigasi pemborosan energi ini, diterapkan teknik Duty Cycling melalui modulasi lebar pulsa (Pulse Width Modulation - PWM) pada sisi pemancar [16].

Secara teoritis, konsumsi daya rata-rata (P_{avg}) dari sebuah LED berbanding lurus dengan rasio siklus kerja (D). Hubungan ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_{avg} = D \times V_{in} \times I_{peak}$$

Dengan menetapkan siklus kerja yang rendah (misalnya 12.5% atau nilai register PWM 32 dari 255), sistem secara efektif mematikan LED selama 87.5% dari total waktu operasional, namun tetap menyalakannya dalam frekuensi tinggi (10 kHz atau lebih). Penghematan daya ini bersifat linear; pengurangan duty cycle sebesar 50% akan menghasilkan penghematan daya LED sebesar 50% pula [16].

2.2.7 LoRa RFM95

LoRa adalah teknologi komunikasi nirkabel revolusioner yang dikembangkan untuk aplikasi *Internet of Things* (IoT), mengadopsi teknik modulasi *Chirp Spread Spectrum* (CSS). Berbeda dengan sistem komunikasi konvensional yang menggunakan frekuensi tetap, CSS memodulasi data ke dalam gelombang "kicauan" (*chirps*) yang frekuensinya menyapu pita lebar (*broadband*). Karakteristik fundamental ini memberikan LoRa keunggulan teoretis berupa Processing Gain, yang memungkinkan penerima untuk mendekode sinyal bahkan ketika berada di bawah tingkat kebisingan termal (thermal noise floor), dengan sensitivitas mencapai -148 dBm [18].

Dalam konteks topografi perkebunan buah, tantangan utama komunikasi nirkabel adalah atenuasi sinyal akibat halangan fisik, terutama vegetasi (*foliage obstruction*). Daun dan batang pohon mengandung air yang menyerap gelombang radio frekuensi tinggi (seperti 2.4 GHz pada WiFi atau ZigBee). LoRa, yang beroperasi pada frekuensi sub-GHz (920-923 MHz di Asia), memiliki karakteristik penetrasi fisik yang jauh lebih unggul. Panjang gelombang yang lebih besar memungkinkan sinyal LoRa untuk mendifraksi di sekitar objek padat dan menembus kanopi pohon dengan redaman (*path loss*) yang jauh lebih rendah dibandingkan protokol frekuensi tinggi [18].

2.2.8 Dynamic Thresholding

Lingkungan operasional luar ruangan (*outdoor*) menghadirkan tantangan berupa derau (*noise*) optik yang dinamis, seperti perubahan intensitas sinar matahari dari pagi hingga sore hari, serta bayangan awan yang bergerak. Metode deteksi konvensional yang menggunakan ambang batas tetap (*fixed threshold*)—misalnya, memicu hitungan jika nilai sensor < 500 —terbukti tidak valid secara ilmiah di lapangan. Nilai dasar (*baseline*) sensor akan bergeser drastis seiring waktu; ambang batas yang valid di pagi hari mungkin akan menyebabkan pemicuan palsu (*false positive*) terus-menerus di siang hari saat matahari terik membanjiri sensor [18].

Solusi yang diterapkan adalah algoritma Dynamic Thresholding berbasis statistik adaptif. Algoritma ini menggunakan filter *Exponential Weighted Moving Average* (EWMA) untuk menciptakan referensi baseline yang terus bergerak mengikuti kondisi lingkungan. Persamaan matematis untuk filter ini adalah:

$$S_t = \alpha \cdot Y_t + (1 - \alpha) \cdot S_{t-1}$$

di mana S_t adalah nilai rata-rata baru, Y_t adalah pembacaan sensor mentah saat ini, dan α adalah koefisien pembobotan ($0 < \alpha < 1$). Fungsi ini bertindak sebagai *Digital Low-Pass Filter* (DLPF), yang secara efektif meredam fluktuasi frekuensi tinggi (seperti *noise* elektronik) sambil tetap

membatasi perubahan lambat (pergeseran posisi matahari) untuk memperbarui baseline.

2.2.9 Mikrokontroler XIAO ESP32C3

Efisiensi energi pada node sensor nirkabel mandiri sangat bergantung pada pemilihan arsitektur unit pemrosesan utama (*Microcontroller Unit - MCU*). Seeed Studio XIAO ESP32-C3 dipilih karena mengadopsi arsitektur prosesor 32-bit RISC-V (Reduced Instruction Set Computer - V). Secara komparatif, arsitektur RISC-V dirancang dengan set instruksi yang lebih sederhana dibandingkan arsitektur Xtensa atau ARM, yang berdampak positif pada efisiensi eksekusi instruksi per siklus clock dan pengurangan konsumsi daya dinamis [19].

Keunggulan utama seri ESP32-C3 terletak pada manajemen mode dayanya, khususnya fitur Light Sleep. Pada generasi mikrokontroler sebelumnya (seperti ESP8266), penghematan daya maksimal hanya dicapai melalui Deep Sleep, yang mematikan memori RAM dan mengharuskan reboot total saat bangun. Proses cold boot ini memboroskan energi yang signifikan untuk inisialisasi ulang perangkat keras. Sebaliknya, ESP32-C3 memungkinkan mode *Light Sleep* di mana periferal dimatikan, clock CPU diturunkan, namun isi memori RAM tetap dipertahankan dengan arus bocor (leakage current) yang sangat rendah. Hal ini memungkinkan mikrokontroler untuk "bangun" dan melanjutkan eksekusi program (seperti mengirim data LoRa) secara instan tanpa biaya energi overhead inisialisasi ulang, strategi yang vital untuk aplikasi baterai jangka panjang [20].

2.2.10 CN3791 Solar Charger

Keberlanjutan sistem IoT di lokasi terpencil bergantung pada keseimbangan antara konsumsi energi dan pemanenan energi (energy harvesting) dari panel surya. Namun, panel surya memiliki karakteristik keluaran daya non-linear yang sangat dipengaruhi oleh intensitas iradians dan suhu. Daya maksimum (Pmax) hanya dapat diekstraksi pada titik

tegangan spesifik yang disebut Maximum Power Point (MPP). Pada lingkungan perkebunan, fenomena bayangan parsial (*partial shading*) dari dedaunan pohon sering kali menyebabkan titik MPP ini bergeser secara dinamis dan drastis [21].

Sistem pengisian daya konvensional (PWM atau Linear) sering kali memaksa panel surya bekerja pada tegangan baterai, yang mungkin jauh di bawah tegangan optimal panel, mengakibatkan hilangnya potensi daya hingga 30-40%. Untuk mengatasi inefisiensi ini, digunakan modul manajemen daya berbasis IC CN3791 yang dilengkapi fitur Maximum Power Point Tracking (MPPT). Sirkuit MPPT secara aktif memantau tegangan keluaran panel dan menyesuaikan impedansi beban masukan secara real-time untuk memastikan panel selalu beroperasi pada titik kurva I-V yang menghasilkan daya maksimum. Teknologi ini menjamin efisiensi pengisian baterai Lithium-Ion tetap optimal bahkan dalam kondisi cahaya rendah (low-light) atau cuaca berawan, memastikan ketersediaan daya yang cukup untuk operasional sensor sepanjang malam [20].

2.2.11 Metrik Evaluasi (*Average Percentage Accuracy*, MAE, MBE, RMSE)

Untuk memvalidasi keandalan sistem penghitungan otomatis, data hasil pembacaan sensor dibandingkan dengan data penghitungan manual (*Ground Truth*) menggunakan serangkaian metrik statistik standar. Evaluasi ini bertujuan untuk mengukur tidak hanya tingkat kesalahan, tetapi juga karakteristik bias dari sensor tersebut [21].

$$\text{Average Percentage Accuracy} = \left(1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|P_i - A_i|}{A_i} \right) \times 100\%$$

Average Percentage Accuracy : mengukur rata-rata akurasi perhitungan dengan membandingkan hitungan benar yang dihasilkan sistem dengan ground truth.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - A_i|$$

Mean Absolute Error (MAE): MAE mengukur rata-rata besarnya kesalahan absolut antara prediksi sistem (P_i) dan nilai aktual (A_i) tanpa memperhatikan arah kesalahan. Metrik ini memberikan gambaran intuitif mengenai seberapa jauh rata-rata penyimpangan hitungan sensor per unit waktu.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - A_i)^2}$$

Root Mean Square Error (RMSE): RMSE menghitung akar kuadrat dari rata-rata kuadrat kesalahan. Berbeda dengan MAE, RMSE memberikan penalti yang lebih besar untuk kesalahan yang bernilai besar (*large errors*). Dalam konteks deteksi hama, RMSE yang tinggi mengindikasikan adanya kejadian outlier yang signifikan, misalnya kegagalan sensor mendeteksi rombongan lalat sekaligus atau *false trigger* yang parah akibat gangguan cuaca ekstrem.

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - A_i)$$

Mean Bias Error (MBE): MBE digunakan untuk mengidentifikasi bias sistematis dalam pengukuran sensor. Nilai MBE positif menunjukkan bahwa sensor memiliki kecenderungan untuk *over-counting* (menghitung terlalu banyak, mungkin karena noise), sedangkan nilai negatif menunjukkan kecenderungan *under-counting* (gagal mendeteksi lalat). Informasi ini sangat krusial untuk kalibrasi ulang algoritma sensitivitas sensor.