

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Sistem pemberian pakan ikan otonom berbasis Internet of Things (IoT) merupakan salah satu inovasi yang banyak dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas budidaya perikanan. Pemanfaatan teknologi IoT memungkinkan proses pemberian pakan dieksekusi secara otomatis, terjadwal, serta dapat dimonitor maupun dikendalikan dari jarak jauh melalui jaringan internet. Selain itu, penggunaan sensor dan aktuator presisi yang terintegrasi dengan mikrokontroler mampu meningkatkan ketepatan jumlah pakan yang diberikan, sehingga dapat mengurangi pemborosan pakan serta meningkatkan efektivitas budidaya ikan.

Diskursus penelitian mengenai smart feeder menunjukkan berbagai pendekatan yang digunakan, mulai dari sistem open-loop berbasis pewaktu (timer), integrasi kendali lingkaran tertutup (closed-loop) menggunakan sensor load cell, hingga pengembangan arsitektur IoT berbasis komputasi awan (cloud). Sebelum mengembangkan sistem yang diusulkan pada penelitian ini, diperlukan kajian terhadap penelitian-penelitian terdahulu untuk mengetahui perkembangan teknologi yang telah ada, mengidentifikasi kelebihan dan kekurangannya, serta menentukan celah penelitian (research gap) yang dapat menjadi dasar pengembangan Smart Feeder System Ikan Lele berbasis IoT dengan Kontrol Timer, Dan Massa Pakan menggunakan ESP32 Menggunakan ESP32.

1. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Dian Kasoni, Liesnaningsih, Rohmat Taufiq, dan Muhammad Syaiful Anwar pada Jurnal of Informatics (JIKA) tahun 2023 dengan judul “Prototipe Smart Fish Feeder Berbasis Automated System Untuk Meningkatkan Budidaya Ikan Lele”, dijelaskan bahwa sistem smart fish feeder menggunakan Arduino Uno Rev3 sebagai pengendali utama, RTC DS3231 sebagai pengatur jadwal pemberian pakan, motor servo sebagai mekanisme buka-tutup saluran pakan, serta motor DC sebagai penyebar pakan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem secara

mekanis mampu mendistribusikan pakan secara otomatis sesuai jadwal yang telah ditentukan. Namun, penelitian ini masih beroperasi secara luring (offline) tanpa kapabilitas Internet of Things (IoT) untuk pemantauan jarak jauh, serta mekanisme penakarannya masih berbasis durasi waktu (volume) tanpa presisi penimbangan riil dari sensor load cell.

2. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Indra Gunawan dan Hamzan Ahmadi pada jurnal Infotek tahun 2024 dengan judul “Kajian dan Rancang Bangun Alat Pakan Ikan Otomatis (Smart Feeder) Pada Kolam Budidaya Ikan Berbasis Internet of Things”, dijelaskan bahwa sistem menggunakan teknologi IoT untuk melakukan monitoring jumlah pakan, kualitas air, serta jadwal pemberian pakan melalui smartphone. Sistem mendemonstrasikan keandalan transmisi data telemetri secara real-time dengan menampilkan log data pemberian pakan yang memiliki waktu respons sekitar ± 2 detik. Akan tetapi, mekanisme distribusi pakan pada studi ini belum mengakomodasi penyebaran sentrifugal yang merata ke seluruh area kolam, serta sistem tersebut belum mengintegrasikan sensor load cell sebagai parameter utama pengontrolan massa pakan.
3. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Qonita Nadya Ramadhani, Ahmad Mushtofa Kamal, dan Deddy Rahmadi pada jurnal Digital Transformation Technology (Digitech) tahun 2025 dengan judul “AquaInnova: Sistem IoT Kendali Jarak Jauh Pakan Lele via Telegram”, dijelaskan bahwa sistem menggunakan ESP8266 dan Telegram Bot sebagai media kontrol jarak jauh. Pendekatan ini menawarkan keuntungan aksesibilitas tinggi, di mana sistem dapat bekerja dalam mode otomatis berdasarkan jadwal maupun mode manual melalui perintah Telegram dengan waktu respons eksekusi di bawah 2 detik. Meskipun terbukti sangat praktis secara antarmuka, fungsionalitas sistem tersebut hanya terbatas pada pemicuan aktuator dan belum mengadopsi mekanisme kendali lingkaran tertutup berbasis sensor massa (load cell), serta belum memiliki fitur pencatatan basis data terstruktur (datalogging) otomatis ke Google Spreadsheet. Dasar Teori.
4. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Zulham Ariyandi, Taufiq, dan

Nunsina pada Journal of Applied Informatics and Computing (JAIC) tahun 2025 dengan judul “Design of an Internet of Things (IoT)-Based Fish Feeder System Using an Android Application”, dijelaskan bahwa sistem menggunakan mikrokontroler ESP32 yang mengolaborasikan sensor load cell, sensor ultrasonik, motor servo, dan Firebase Realtime Database sebagai media komunikasi data dengan aplikasi Android. Sistem ini mampu melakukan pemberian pakan secara otomatis maupun manual serta memverifikasi massa pakan dengan tingkat toleransi galat hanya ± 5 gram. Meskipun performa teknisnya sangat akurat, penelitian ini menggunakan aplikasi Android kustom (native/Flutter) yang menuntut overhead pemeliharaan perangkat lunak yang kompleks bagi peternak awam. Integrasi kontrol menggunakan platform hibrida universal dan ringan seperti Telegram Bot yang dipadukan dengan rekam jejak pada Google Spreadsheet belum dieksplorasi pada penelitian tersebut.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Budidaya Ikan lele dan Manajemen Pemberian Pakan

Pakan merupakan instrumen biologis dan ekonomis paling fundamental dalam sistem akuakultur yang berperan langsung terhadap parameter laju pertumbuhan spesifik (Specific Growth Rate/SGR), tingkat kelangsungan hidup (Survival Rate/SR), dan rasio konversi pakan (Feed Conversion Ratio/FCR). Dalam struktur pembiayaan budidaya ikan lele (*Clarias spp.*), penyediaan pakan komersial mendominasi beban modal operasional dengan proporsi yang sangat tinggi, yakni mencapai 60% hingga 70% dari total biaya produksi [1], [2]. Oleh karena itu, penerapan manajemen pakan yang terukur sangat krusial guna mengoptimalkan konversi nutrisi menjadi biomassa ikan sekaligus meminimalisasi kerugian finansial.

Secara teknis dan ekologis, manajemen pakan yang efektif pada budidaya ikan lele bersumbu pada tiga parameter operasional utama, yaitu kuantitas (massa) pakan, frekuensi pemberian (penjadwalan waktu), dan homogenitas distribusi pakan secara spasial [3].

Pertama, penentuan kuantitas atau massa pakan harian harus dikalibrasi

secara presisi berdasarkan persentase bobot biomassa total ikan dalam suatu kolam, yang secara terminologi dikenal sebagai Feeding Rate (FR). Pemberian pakan dengan FR yang tidak proporsional atau berada di bawah ambang batas (underfeeding) akan menyebabkan ikan mengalami defisiensi nutrisi, memperlambat fase pertumbuhan, serta menstimulasi tingginya tingkat kanibalisme akibat sifat alamiah karnivora dari ikan lele [1]. Sebaliknya, pemberian massa pakan yang melebihi kapasitas serapan biologis ikan (overfeeding) akan bermuara pada penumpukan sisa bahan organik non-konsumsi di perairan.

Kedua, frekuensi pemberian pakan (feeding frequency) berkaitan erat dengan dinamika fisiologis pencernaan ikan lele. Peningkatan frekuensi pemberian pakan dalam porsi yang terkontrol terbukti secara empiris menghasilkan signifikansi pertumbuhan yang lebih baik [2].

2.2.2 *Internet of Things (IoT)*

Internet of Things (IoT) merepresentasikan sebuah paradigma teknologi revolusioner yang mengintegrasikan komputasi perangkat fisik—seperti mikrokontroler, sensor, dan aktuator—dengan konektivitas jaringan internet global. Arsitektur dasar IoT beroperasi pada prinsip pertukaran data secara otonom antarperangkat (Machine-to-Machine atau M2M). Melalui instruksi pemrograman komputasional yang tertanam di dalamnya, objek fisik diinstrumentasikan sedemikian rupa agar mampu mengumpulkan, mentransmisikan, dan merespons informasi secara otomatis tanpa memerlukan campur tangan manusia secara langsung [4].

Dalam konteks akuakultur dan budidaya perikanan, implementasi teknologi IoT telah diakui sebagai solusi komprehensif untuk meningkatkan efisiensi operasional dan efektivitas pengelolaan lingkungan budidaya [4]. Integrasi infrastruktur IoT pada fasilitas akuakultur memungkinkan pembudidaya untuk melakukan pengendalian (controlling) dan pemantauan (monitoring) kondisi operasional secara real-time dan dari jarak jauh. Melalui konektivitas nirkabel (wireless), batasan geografis dan proksimitas fisik dapat dieliminasi secara efektif, sehingga pembudidaya tidak lagi diwajibkan untuk hadir secara kontinu di lokasi kolam demi menjalankan rutinitas pemeliharaan fisik [4], [5].

Pada ekosistem otomasi terintegrasi seperti Smart Feeder System, IoT bertindak sebagai tulang punggung (backbone) komunikasi telemetri yang menjembatani node komputasi lokal—dalam hal ini mikrokontroler ESP32—dengan platform layanan cloud (seperti Google Spreadsheet) serta antarmuka komunikasi pengguna (seperti integrasi API Telegram). Sistem berbasis IoT ini secara fundamental mentransformasi peran manusia; dari yang sebelumnya bertindak sebagai pelaksana tugas manual yang repetitif, menjadi entitas penyalia (supervisor) dan pembuat keputusan strategis (decision maker) berdasarkan metrik data historis yang dikirimkan oleh perangkat [4].

Dengan demikian, penerapan arsitektur IoT tidak hanya memfasilitasi eksekusi mekanis seperti ketepatan penjadwalan (timer) dan akurasi kalibrasi pakan, melainkan turut memberikan visibilitas sistem, kemudahan rekam jejak (data logging), dan keandalan sistem pemantauan secara menyeluruh dalam mewujudkan modernisasi budidaya ikan lele berskala mikro hingga menengah.

2.2.3 ESP 32

ESP32 Mikrokontroler merupakan sistem komputer terintegrasi dalam satu cip (chip) yang memiliki Central Processing Unit (CPU), memori, serta port input/output (I/O) yang digunakan untuk mengendalikan suatu sistem atau perangkat elektronik secara spesifik. Mikrokontroler dirancang untuk menjalankan tugas tertentu (special purpose computer) dengan konsumsi daya yang relatif rendah dan ukuran yang ringkas. Dalam satu cip mikrokontroler umumnya telah terintegrasi berbagai modul pendukung seperti RAM, ROM atau flash memory, timer, counter, komunikasi serial, serta modul analog seperti Analog to Digital Converter (ADC) dan Digital to Analog Converter (DAC). Pada sistem tertanam (embedded system), mikrokontroler berfungsi sebagai pengendali utama yang menerima input dari sensor, memproses data sesuai dengan program yang ditanamkan, kemudian menghasilkan output atau data informasi yang diperlukan. Kemampuan ini menjadikan mikrokontroler banyak digunakan pada sistem otomasi, sistem monitoring, serta aplikasi Internet of Things (IoT).

ESP32 merupakan mikrokontroler berbasis System on Chip (SoC) fabrikasi Espressif Systems yang merupakan pengembangan dari seri pendahulunya

(ESP8266) dengan fitur dan kinerja yang jauh lebih tinggi. Mikrokontroler ini dirancang secara khusus untuk mendukung aplikasi IoT dengan menyediakan konektivitas Wi-Fi dan Bluetooth dalam satu modul tunggal. Varian development board yang digunakan pada sistem ini adalah ESP32 DOIT DevKit V1 dengan konfigurasi 30 pin.

Pada perancangan sistem smart feeder, ESP32 bekerja sebagai otak pengendali utama yang bertugas membaca dan memproses data dari perangkat eksternal seperti sensor load cell dan modul RTC, mengeksekusi aktuator (motor servo dan motor DC), lalu mengirimkan log data tersebut ke jaringan cloud (seperti platform Telegram dan Google Spreadsheet). ESP32 memiliki beberapa mode operasi manajemen daya yang dirancang untuk memperpanjang masa pakai sistem, sebagaimana dijelaskan pada Tabel 2-1.

Tabel 2- 1 Mode Operasi ESP32

Mode	Deskripsi
Active Mode	Proses berjalan pada kecepatan penuh dan semua fitur (Wi-Fi, Bluetooth, periferan) aktif.
Modern Sleep	Wi-Fi atau Bluetooth dinonaktifkan, sementara prosesor tetap aktif untuk mengeksekusi tugas-tugas komputasi tertentu.
Light Sleep	Prosesor dimatikan untuk menghemat daya, sementara memori (RAM) tetap aktif menyimpan status terakhir.
Deep Sleep	Hampir semua fungsi modul dimatikan, kecuali <i>Real Time Clock</i> (RTC) internal dan <i>Ultra-Low Power</i> (ULP) <i>coprocessor</i> .

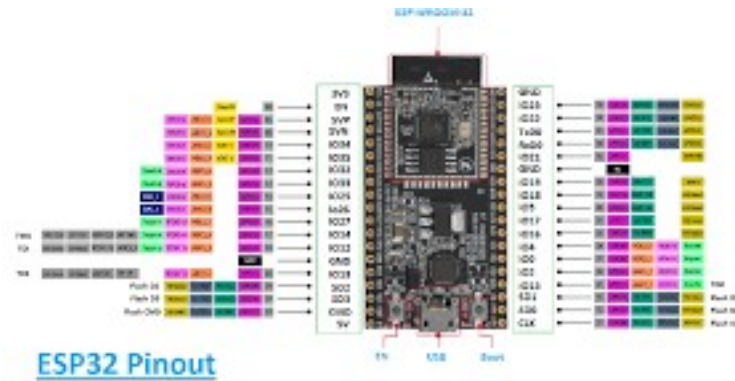
Secara spesifikasi teknis, ESP32 ditenagai oleh prosesor dual-core Xtensa® 32-bit LX6 yang sangat tangguh. Spesifikasi lengkap dari modul ESP32 DevKit V1

(30 Pin) yang digunakan dalam sistem ini dapat dilihat pada Tabel 2-2.

Tabel 2- 2 Spesifikasi ESP32

Kategori	Spesifikasi
Proses	Dual-core Xtensa® 32-bit LX6, hingga 240 MHz per core
Memori	520 KB SRAM, hingga 16 MB Flash
Konektivitas	Wifi: IEEE 802.11 b/g/n (2.4 GHz), Bluetooth 4.2 (Classic & BLE)
GPIO	35 Pin
ADC	12-bit ADC, hingga 18 saluran
DAC	8-bit DAC (2 saluran)
PWM	Hingga 16 saluran PWM
I2C, SPI, UART	Ada
Tegangan Input	5V
Tegangan Kerja	3.3V (Operasi stabil di angka 2.2V – 3.6V)
Konsumsi Daya	Active mode: ~160 Ma, Modem Sleep: ~30 mA, Light Sleep: ~0,8 mA, Deep Sleep:
Ukuran Modul	18 x 25.5 mm
Jumlah Pin	30 Pin
WiFi Range	Hingga 200 meter (tergantung kondisi lingkungan)
Bluetooth Range	Hingga 100 meter untuk BLE (tergantung daya transmisi)
Lingkungan Kerja	Suhu : -40°C hingga +125°C, Kelembapan: 5% hingga 95% (non-kondensasi)
Sistem Operasi	Mendukung FreeRTOS, Arduino IDE, Espressif IDF, PlatformIO
Platform Pengembangan	Arduino IDE, Espressif IoT Development Framework (IDF), PlatformIO

Bentuk fisik dan deskripsi konfigurasi pin (pinout) dari mikrokontroler ESP32 DevKit V1 30 pin ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Pinout ESP32 DOIT DevKit V1 - 30 Pin

Untuk menjalankan proses pengolahan data sesuai dengan fungsi otomatis yang dirancang, mikrokontroler ESP32 harus diprogram menggunakan serangkaian instruksi logika yang disimpan dalam memori internal. Instruksi tersebut ditulis menggunakan bahasa pemrograman turunan C/C++, kemudian dikompilasi dan diunggah (flashing) ke dalam mikrokontroler agar dapat dieksekusi sesuai dengan algoritma sistem. Salah satu perangkat lunak yang banyak digunakan dalam proses pemrograman ESP32 adalah Arduino Integrated Development Environment (Arduino IDE). Perangkat lunak ini menyediakan antarmuka visual yang terpadu serta pustaka (library) pendukung yang sangat ekstensif untuk mempermudah proses penulisan kode, pengujian, hingga pengunggahan program ke dalam mikrokontroler.

2.2.4 Real Time Clock (RTC) DS3231

Real Time Clock (RTC) DS3231 merupakan modul pewaktu elektronik presisi tinggi yang berfungsi untuk menyediakan referensi waktu nyata (real-time clock/calendar) secara kontinu kepada mikrokontroler. Modul ini mengelola data detik, menit, jam, hari, tanggal, bulan, hingga tahun secara otonom serta dilengkapi dengan fitur kompensasi tahun kabisat hingga tahun 2100. Komunikasi data antara modul DS3231 dan ESP32 dilakukan melalui protokol antarmuka serial I2C (Inter-Integrated Circuit) menggunakan jalur Serial Data (SDA) dan Serial Clock (SCL) [

Keunggulan fundamental dari DS3231 dibandingkan modul RTC standar (seperti DS1307) terletak pada integrasi Temperature-Compensated Crystal Oscillator (TCXO) dan resonator kristal internal 32,768 kHz di dalam satu kemasan

IC. Perubahan suhu lingkungan umumnya dapat menggeser frekuensi osilasi kristal (crystal drift), yang berakibat pada akumulasi deviasi waktu. Integrasi sensor suhu internal pada TCXO DS3231 memfasilitasi penyesuaian nilai kapasitansi osilator secara periodik sesuai dengan dinamika suhu terukur, sehingga menghasilkan akurasi tinggi dengan laju deviasi maksimal hanya sebesar ± 2 ppm (setara dengan ± 2 menit per tahun) pada rentang suhu operasional 0°C hingga $+40^{\circ}\text{C}$ [3]. Spesifikasi teknis dari modul RTC DS3231 disajikan pada Tabel 2-3.

Tabel 2- 3 Spesifikasi Teknis Modul RTC DS3231

Kategori	Spesifikasi
Model Cip Pewaktu	Dallas/Maxim DS3231
Tegangan Operasi	3,3 V hingga 5,5 V DC
Akurasi Waktu	± 2 ppm (deviasi < 2 menit/tahun) pada suhu $0^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C}$
Protokol Komunikasi	I2C Fast Mode (400 kHz)
Baterai Cadangan	Lithium Coin Cell CR2032 (3 V)
Fitur Memori Tambahan	EEPROM AT24C32 terintegrasi (kapasitas 32 KB)
Rentang Suhu Kerja	-40°C hingga $+85^{\circ}\text{C}$

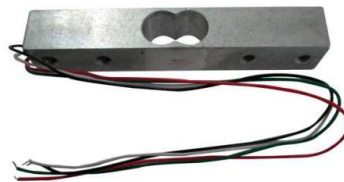
Dalam arsitektur smart feeder, RTC DS3231 berfungsi sebagai penentu waktu absolut (absolute timekeeper) untuk memicu eksekusi pewaktuan pakan. Adanya baterai cadangan Lithium CR2032 (3 V) menjamin bahwa siklus kalkulasi waktu tetap berlanjut meskipun sistem mengalami kegagalan atau pemutusan pasokan daya utama (power outage). Bentuk fisik modul RTC DS3231 diperlihatkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Modul Real Time Clock (RTC) DS3231

2.2.5 Sensor Load Cell dan Modul Penguat HX711

Load cell merupakan transduser elektromekanis yang difungsikan untuk mengonversi besaran gaya mekanis (dalam konteks ini berupa beban atau massa pakan) menjadi sinyal elektrik analog linier. Topologi yang paling umum diimplementasikan pada sistem otomasi penimbangan adalah strain gauge load cell. Konfigurasi arsitektural dari sensor ini terdiri atas elemen strain gauge (pengukur regangan) yang terpasang pada struktur aluminium fleksibel dan dirangkai membentuk sirkuit Jembatan Wheatstone (Wheatstone bridge). Prinsip kerjanya didasarkan pada deformasi fisik; saat pembebanan diaplikasikan ke struktur aluminium, elemen strain gauge akan mengalami deformasi mekanis mikro, baik berupa regangan maupun kompresi. Deformasi ini memicu fluktuasi nilai resistansi elektrik pada elemen tersebut, yang secara langsung mendisrupsi keseimbangan tegangan ekuilibrium pada Jembatan Wheatstone. Ketidakseimbangan resistif ini menghasilkan luaran (output) berupa sinyal diferensial analog dalam spektrum amplitudo yang sangat kecil, yakni dalam skala milivolt per volt (mV/V), yang memiliki korelasi linier terhadap gaya berat yang diberikan. Bentuk fisik dari sensor load cell ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Sensor Load Cell

Mengingat sinyal analog yang dihasilkan oleh load cell berada dalam orde amplitudo yang terlampau kecil untuk diakuisisi secara langsung oleh pin GPIO mikrokontroler, dibutuhkan sebuah modul pengondisi sinyal sekaligus Analog-to-Digital Converter (ADC), yaitu modul HX711. Modul HX711 dirancang secara eksklusif oleh Avia Semiconductor untuk aplikasi instrumen timbangan presisi tinggi (weigh scales). Komponen utama dari modul ini adalah perangkat

Programmable Gain Amplifier (PGA) internal terintegrasi dan sebuah unit ADC beresolusi tinggi 24-bit. Resolusi kuantisasi 24-bit memberikan tingkat granularitas pembacaan yang luar biasa, memungkinkan mikrokontroler mendeteksi deviasi massa yang sangat preskriptif pada fraksi desimal gram. Spesifikasi teknis dari modul penguat HX711 disajikan pada Tabel 2-4.

Tabel 2- 4 Spesifikasi HX711

Parameter	Spesifikasi Teknis
Resolusi <i>Analog-to-Digital Converter</i> (ADC)	24-bit
VCC	2,6 V – 5,5 V DC
Konsumsi Arus Operasional (Normal Mode)	< 1,5 mA
Konsumsi Arus (Power Down Mode)	< 1 μ A
Programmable Gain Amplifier (PGA)	32, 64, dan 128 (Kanal A: 64/128, Kanal B: 32)
Data Rate	10 SPS atau 80 SPS (<i>selectable</i>)
Format Data Output	24-bit <i>two's complement</i>
Interface	Serial 2-wire (PD_SCK & DOUT)

Dalam rancang arsitektur Smart Feeder System, integrasi sensor load cell dan modul HX711 merepresentasikan perwujudan dari parameter esensial, yakni Kontrol Massa Pakan. Berbeda secara fundamental dengan mayoritas sistem feeder konvensional yang hanya mengandalkan estimasi durasi waktu bukaan katup (berbasis proyeksi waktu) yang rawan terhadap margin deviasi (*margin error*), sistem ini mendayagunakan load cell sebagai instrumen umpan balik kalibrasi (*closed-loop feedback*).

Selama proses pelontaran pakan berlangsung, mikrokontroler ESP32 mengekstraksi paket data serial dari HX711 secara kontinu dan real-time. Apabila kalkulasi kumulatif massa pakan yang terdeteksi berkurang telah menyamai batas ambang (*threshold*) kebutuhan pakan harian (*Feeding Rate*), ESP32 seketika menginstruksikan aktuator katup (seperti motor servo) untuk bermanuver menutup

saluran. Mekanisme fungsional ini memberikan garansi teknis bahwa dosis pakan yang dikeluarkan benar-benar presisi sesuai dengan rasio biomassa ikan lele, sekaligus mengeliminasi inefisiensi kerugian akibat overfeeding maupun risiko hambatan pertumbuhan akibat *underfeeding*.

2.2.6 Motor Servo MG996R

Motor servo merupakan aktuator mekatronika berjenis putar (rotary actuator) yang didesain secara spesifik untuk menghadirkan presisi tinggi dalam pengendalian posisi sudut (angular position), kecepatan, dan akselerasi mekanis. Secara arsitektural, perangkat ini mengintegrasikan motor arus searah (DC), sistem transmisi roda gigi reduksi (gearbox), potensiometer sebagai sensor umpan balik posisi (positional feedback), dan sirkuit kontrol elektronik di dalam satu modul tertutup. Pengendalian pergerakannya diimplementasikan melalui modulasi sinyal Pulse Width Modulation (PWM), di mana sirkuit internal mengkalibrasi durasi siklus kerja (duty cycle) dari mikrokontroler dan mengkalibrasinya dengan posisi aktual poros yang dideteksi oleh potensiometer.

Dalam rancang bangun sistem ini, digunakan varian motor servo MG996R (Gambar 2.4) yang direkomendasikan secara ekstensif untuk aplikasi dengan beban kelembaman (inertia) dan friksi mekanis yang tinggi [10]. Tipe ini merupakan bentuk penyempurnaan rekayasa dari seri pendahulunya (MG995), yang ditandai dengan pembaruan komprehensif pada desain Printed Circuit Board (PCB) dan Integrated Circuit (IC) kontrol. Pembaruan tersebut menghasilkan respons pemusatan pergerakan yang sangat presisi dengan batas toleransi ketidakpekaan sinyal (dead band width) yang sangat sempit, yakni 1 μ s.

Dalam topologi Smart Feeder System, keunggulan fundamental MG996R yang mengadopsi material roda gigi logam murni (full metal gear) dan sistem bantalan bola ganda (dual ball bearing) menjadikannya aktuator mekanis utama yang ideal untuk mengontrol mekanisme buka-tutup katup hopper. Konfigurasi perangkat keras tersebut memungkinkan motor ini menghasilkan torsi henti (stall torque) yang eskalatif hingga 11 kg-cm pada tegangan operasi 6 Volt [10]. Pemilihan spesifikasi bertorsi tinggi ini didasari oleh justifikasi teknis yang krusial; tumpukan butiran pelet pakan memiliki densitas padat yang rentan memicu friksi

serta penjepitan mekanis (jamming) pada area celah pembuangan. Daya dorong dan potong mekanis yang dihasilkan aktuator ini terbukti tangguh untuk mendisrupsi sumbatan tersebut secara persisten.

Secara operasional, motor servo MG996R bekerja komplementer membentuk siklus tertutup (closed-loop) yang terintegrasi dengan sensor load cell. Saat jadwal pemberian pakan terpicu, mikrokontroler ESP32 mentransmisikan sinyal PWM spesifik yang menginstruksikan servo berotasi untuk membuka katup secara akurat. Segera setelah modul HX711 mengonfirmasi bahwa kuantitas massa pakan yang dijatuhkan telah mencapai target Feeding Rate, ESP32 seketika merevisi sinyal PWM untuk memicu rotasi reversibel pada servo. Mekanisme cepat tanggap ini memastikan katup kembali ke posisi tertutup rapat guna mencegah deviasi atau kelebihan luaran massa pakan [4].

Tabel 2- 5 Spesifikasi Motor Servo MG996R

Parameter	Spesifikasi Motor Servo
Klasifikasi Aktuator	Aktuator putar presisi (<i>Rotary actuator</i>)
Material Roda Gigi	Logam murni (<i>Full metal gear</i>)
Sistem Bantalan Rotasi	Bantalan bola ganda (<i>Dual ball bearing</i>)
Tegangan Operasi	6 Volt
Torsi Maksimum	11 kg-cm (<i>Stall torque</i>)
Antarmuka Kontrol	Sinyal <i>Pulse Width Modulation</i> (PWM)
Lebar Pita Mati	1 μ s (<i>Microsecond</i>)

2.2.7 Motor DC 775

Motor arus searah (Direct Current atau DC) merupakan mesin listrik yang berfungsi mengonversi energi listrik searah menjadi energi mekanis berupa gerakan rotasi. Prinsip kerja fundamental motor DC didasarkan pada Hukum Gaya Lorentz, di mana konduktor pembawa arus listrik (kumparan rotor) yang berada di dalam medan magnet statis (stator) akan mengalami gaya elektromagnetik yang

mendorong poros motor untuk berputar. Modulasi terhadap amplitudo tegangan masukan (input voltage) berbanding lurus secara linier dengan kecepatan putaran rotasi poros motor yang diukur dalam satuan Revolutions Per Minute (RPM).

Dalam perancangan sistem elektromekanis skala menengah, motor DC seri 775 menjadi salah satu standar industri untuk kriteria motor berus (brushed motor) yang membutuhkan perpaduan antara kecepatan rotasi tinggi (high-speed) dan daya pelintir masif (high-torque). Motor ini beroperasi secara optimal pada rentang tegangan nominal 12 V hingga 24 V DC. Arsitektur internalnya terdiri atas kumparan tembaga (copper winding) yang tebal serta susunan magnet permanen berintensitas tinggi, memungkinkannya mengeksekusi rotasi pada spektrum 10.000 hingga 20.000 RPM tanpa mengalami penurunan daya pelintir (stall). Selain itu, motor ini dilengkapi kipas pendingin internal (built-in cooling fan) pada poros rotornya untuk mendisipasi akumulasi panas secara otonom saat beroperasi pada kecepatan tinggi dan kelembaman beban yang ekstrem.



Gambar 2. 4 Motor DC 775

Dalam arsitektur Smart Feeder System, motor DC 775 difungsikan sebagai aktuator utama penggerak modul pelontar pakan (feed distributor) guna merealisasikan parameter operasional "Distribusi Merata". Mekanismenya dirancang secara terintegrasi: ketika katup pakan dibuka oleh motor servo dan porsi pelet divalidasi oleh load cell, pakan tidak dibiarkan menumpuk secara pasif di bawah wadah. Aliran pelet diarahkan jatuh tepat di atas piringan pelontar (spreader disc) yang dikopel secara langsung (direct-coupled) dengan poros motor DC 775.

Memanfaatkan gaya sentrifugal yang dihasilkan oleh putaran piringan

berkecepatan tinggi (melampaui 10.000 RPM), butiran pelet dilontarkan secara radial dengan jangkauan sebaran (throw distance) yang luas ke seluruh area permukaan kolam. Sebagaimana divalidasi oleh Kasoni et al. [1], integrasi motor DC pada mekanisme pakan pintar terbukti secara empiris mampu mengeliminasi fenomena pemberian pakan terpusat (localized feeding). Disrupsi metode ini berhasil mendemokratisasi akses nutrisi bagi seluruh populasi ikan lele secara merata, meminimalkan disparitas ukuran saat panen akibat dominasi individu ikan yang agresif, serta mengoptimalkan rasio konversi pakan (Feed Conversion Ratio / FCR) secara komprehensif.

Tabel 2- 6 Spesifikasi Motor DC775

Parameter	Spesifikasi Teknis
Jenis Motor	Brushed Direct Current (DC) Motor
Tegangan Operasional Nominal	12V – 24V
Kecepatan Tanpa Beban	10.000 RPM (12V) / 20.000 RPM (24V)
Arus Tanpa Beban	± 1.05 A (pada 12 V)
Torsi Nominal	0.2 N.m (<i>Newton meters</i>)
Torsi Puncak	0.7 N.m
Arus Henti	Hingga 10 A – 20 A (Diperlukan pasokan daya dengan <i>rating</i> Ampere tinggi)
Diameter Poros	5.0 mm
Diameter Silinder Motor	42.0 mm
Panjang Bodi motor	66.5 mm (tanpa Panjang poros)
Sistem Managemen Termal	<i>Built-in internal cooling fan</i> (Kipas rotor internal)

2.2.8 MOSFET IRLZ44N dan Arsitektur Gate Driver

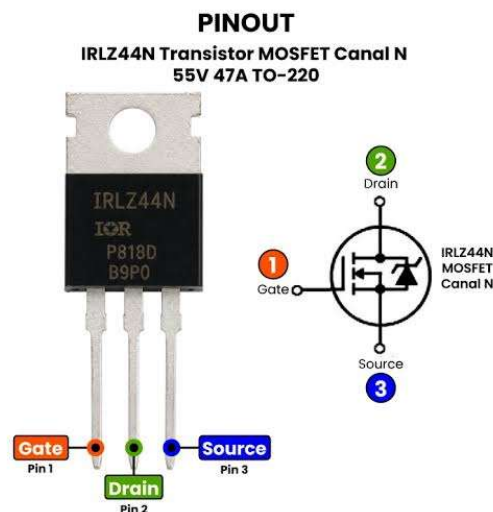
Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) merupakan

komponen semikonduktor daya yang berfungsi sebagai sakelar elektronik berkecepatan tinggi untuk mengendalikan beban berarus besar melalui intervensi sinyal tegangan rendah. Dalam sistem elektromekanis yang menggerakkan aktuator berdaya tinggi seperti Motor DC 775, penggunaan MOSFET tipe IRLZ44N menjadi solusi teknis yang efisien. Komponen ini diklasifikasikan sebagai Logic-Level N-Channel MOSFET yang memiliki spesifikasi tegangan ambang gerbang (Gate Threshold Voltage atau $V_{gs(th)}$) sangat rendah. Berbeda dengan MOSFET daya konvensional (seperti seri IRFZ44N) yang umumnya membutuhkan tegangan gerbang minimal 10 V untuk mencapai kondisi saturasi penuh, IRLZ44N dirancang khusus untuk dapat berkonduksi secara optimal dengan resistansi internal ($R_{ds(on)}$) minimum hanya menggunakan rentang tegangan logika 3,3 V hingga 5 V. Karakteristik elektris ini memungkinkannya diinterkoneksi dan dikendalikan secara langsung oleh pin General Purpose Input/Output (GPIO) mikrokontroler ESP32 tanpa memerlukan bantuan IC driver penguat tegangan tambahan [12].

Meskipun IRLZ44N mendukung penerimaan sinyal logika secara langsung dari mikrokontroler, lapisan antarmuka fisik antara pin GPIO ESP32 dan terminal Gate tetap memerlukan rangkaian pengondisi sinyal (gate drive circuit) yang presisi guna menjamin stabilitas dan keselamatan perangkat keras. Secara fisik, terminal Gate pada MOSFET memiliki kapasitansi parasitik internal yang berperilaku selayaknya kapasitor murni. Ketika pin GPIO mendadak beralih ke sinyal logika High (3,3 V), kapasitansi gerbang tersebut akan menyerap lonjakan arus transien (inrush current) secara signifikan dalam skala mikrodetik. Untuk memitigasi lonjakan arus yang berpotensi merusak pin ESP32 secara permanen, dipasang sebuah resistor pembatas arus (gate resistor) bernilai $330\ \Omega$ secara seri di antara pin mikrokontroler dan terminal Gate. Hambatan $330\ \Omega$ ini berfungsi mengontrol kurva pengisian dan pengosongan muatan kapasitansi gerbang secara proporsional, sehingga mikrokontroler tetap beroperasi pada zona arus yang aman tanpa mengorbankan kecepatan pensaklaran MOSFET secara drastis.

Sebagai eskalasi mekanisme perlindungan terhadap anomali perangkat keras, arsitektur gate driver ini diwajibkan mengintegrasikan skema pull-down menggunakan resistor $10\ k\Omega$ yang dipasang melintang antara terminal Gate dan

Source. Nilai hambatan tinggi sebesar 10 k Ω dipilih untuk mencegah efek pembagi tegangan (voltage divider) yang dapat mereduksi magnitudo sinyal utama. Resistor pull-down berperan krusial sebagai jalur pembuangan sisa muatan elektrostatik dengan cara menarik tegangan pada terminal Gate secara paksa menuju titik referensi Ground (0 V) saat pin mikrokontroler berada dalam status mengambang (floating state). Kondisi mengambang ini kerap terjadi pada saat mikrokontroler mengalami pemutusan/pemasangan daya (booting), reset, atau kegagalan eksekusi perangkat lunak. Tanpa kehadiran resistor pull-down, akumulasi muatan parasitik liar dapat memicu MOSFET beroperasi pada wilayah konduksi parsial secara tak disengaja. Anomali ini tidak hanya memicu motor pelontar berputar di luar jadwal algoritma, tetapi juga berisiko menimbulkan lonjakan panas ekstrem (thermal runaway) yang dapat merusak struktur silikon MOSFET secara permanen [12].



Gambar 2. 5 PINOUT IRLZ44N

2.2.9 Step Down Buck Converter

Dalam perancangan arsitektur perangkat keras tertanam (embedded system), ketersediaan infrastruktur pasokan daya yang stabil dan efisien merupakan parameter fundamental yang memengaruhi keseluruhan reliabilitas operasional alat. Untuk mengakomodasi diferensiasi level tegangan yang dibutuhkan oleh mikrokontroler dan aktuator beban, digunakan perangkat konverter DC-DC

bertopologi penurun tegangan (buck converter). Berbeda secara komprehensif dengan regulator tegangan linier konvensional yang mendisipasi sisa tegangan dalam bentuk panas termal yang terbuang, buck converter mengadopsi prinsip pensaklaran frekuensi tinggi (high-frequency switching). Mekanisme elektromekanis ini memungkinkannya untuk merekayasa besaran tegangan input menjadi tegangan output yang lebih rendah dengan mempertahankan ekuilibrium efisiensi daya yang sangat tinggi, sehingga meminimalisasi fenomena kerugian energi (power loss) [13].

Sebagai tulang punggung distribusi daya pada Smart Feeder System ini, dipilih modul buck converter berdaya masif yang diotaki oleh sirkuit terpadu (IC) XL4016E1. Cip XL4016E1 diklasifikasikan sebagai Pulse Width Modulation (PWM) buck converter yang direkayasa secara spesifik untuk mengakomodasi dan mengeksekusi penyaluran beban arus searah hingga 8 Ampere secara kontinu. Komponen semikonduktor ini beroperasi pada frekuensi pensaklaran internal (switching frequency) sebesar 180 kHz. Tingginya frekuensi osilasi tersebut memberikan keuntungan teknis yang signifikan; ia memungkinkan penggunaan komponen filter (induktor dan kapasitor) berdimensi fisik lebih kecil, sembari secara simultan mendisipasi riak tegangan (voltage ripple) yang sangat rendah pada titik keluaran akhirnya. Lebih lanjut, arsitektur internal XL4016E1 telah disokong oleh matriks proteksi sirkuit yang komprehensif, mencakup pembatasan arus otomatis (current limit protection) serta fitur pemadaman termal (thermal shutdown) yang akan memutus aliran daya seketika apabila mendeteksi eskalasi suhu di luar ambang batas aman toleransi silikon [13].

Integrasi modul XL4016E1 pada sistem otomasi pemberian pakan ini memiliki justifikasi teknis yang sangat krusial untuk mencegah terjadinya anomali malfungsi pada lapisan mikrokontroler. Sesuai dengan rancangannya, Smart Feeder System mengendalikan entitas beban mekanis yang reaktif, yakni motor arus searah (DC) 775 dan motor servo MG996R. Ketika aktuator-aktuator tersebut mulai berakselerasi dari kondisi inersia diam, mereka akan menarik arus transien kejut (inrush current) yang sangat fluktuatif. Apabila sistem catu daya yang menyuplai logika ESP32 tidak dikonfigurasi menggunakan modul penurun tegangan

berkapasitas raksasa seperti XL4016E1, lonjakan penarikan arus mekanis tersebut berpotensi mendistorsi suplai kelistrikan pusat, yang memicu terjadinya tegangan jatuh (voltage drop atau brown-out). Kondisi tegangan jatuh akan menyebabkan mikrokontroler ESP32 kehilangan daya sepersekian detik dan mengalami restart secara acak (random reboot) di tengah-tengah jadwal pemberian pakan. Dengan kapabilitas penghantaran arus hingga 8 Ampere, modul XL4016E1 memberikan garansi stabilitas catu daya yang absolut, memastikan modul pemrosesan ESP32 dan sensor load cell tetap beroperasi secara seamless tanpa terintervensi oleh guncangan beban dari komponen aktuator [13].

2.2.10 Liquid Crystal Display (LCD)

Liquid Crystal Display (LCD) merupakan modul penampil elektronik yang memanfaatkan sifat modulasi cahaya dari susunan material kristal cair. Prinsip kerja kelistrikannya dilandaskan pada pengontrolan tegangan yang diaplikasikan pada partikel kristal cair yang diapit oleh sepasang filter kaca terpolarisasi. Injeksi tegangan elektrik pada matriks tersebut akan merekayasa orientasi molekul kristal cair, yang secara optik mengatur intensitas cahaya dari backlight (lampu latar) yang dapat diteruskan untuk membentuk representasi pola karakter visual. Modul LCD dengan spesifikasi dimensi matriks 16×2 adalah salah satu varian antarmuka yang paling ekstensif digunakan dalam perancangan sistem tertanam (embedded system). Layar ini memiliki kapabilitas resolusi untuk menampilkan 16 karakter alfanumerik secara horizontal yang didistribusikan dalam 2 baris vertikal. Layar LCD pada dasarnya dikendalikan oleh cip mikrokontroler internal berstandar industri, yakni komponen HD44780 [14].

Dalam konfigurasi sirkuit antarmuka paralel konvensional, jalur komunikasi antara mikrokontroler utama dengan layar LCD 16×2 menuntut utilisasi kabel yang sangat boros, yakni memakan setidaknya 6 hingga 8 pin General Purpose Input/Output (GPIO). Penggunaan pin dalam jumlah masif ini tentu mengorbankan efisiensi arsitektur perangkat keras, terkhusus pada sistem berdesain kompleks yang harus mengakomodasi interkoneksi ke berbagai sensor dan aktuator mekanis. Untuk mendisrupsi inefisiensi transmisi data tersebut, layar LCD pada perancangan sistem ini diintegrasikan secara fisik dengan modul konverter komunikasi

serial Inter-Integrated Circuit (I2C) yang diotaki oleh sirkuit terpadu PCF8574. Cip PCF8574 beroperasi sebagai ekspander Input/Output (I/O) berarsitektur 8-bit yang mampu menerjemahkan protokol paket data serial I2C dari mikrokontroler ESP32 (melalui jalur komunikasi SDA dan SCL) menjadi data biner paralel yang dapat dieksekusi langsung oleh driver layar LCD. Integrasi perangkat backpack I2C ini memangkas kebutuhan konektivitas fisik secara drastis dari 8 kabel menjadi hanya 4 pin utama (VCC, GND, SDA, dan SCL), sehingga mengoptimalkan alokasi sisa pin GPIO pada mikrokontroler ESP32 untuk keperluan komputasi fitur yang lain [14].

Pada infrastruktur arsitektural Smart Feeder System, modul LCD 16×2 berkolaborasi secara holistik sebagai Human-Machine Interface (HMI) lokal yang menempel pada dimensi sasis alat. Layar ini difungsikan secara eksklusif untuk merepresentasikan indikator status operasional sistem secara aktual (real-time). Mikrokontroler ESP32 akan mengekstraksi dan menyajikan parameter data dinamis yang esensial secara periodik pada LCD, mencakup penunjuk waktu penjadwalan yang disinkronisasi dari RTC DS3231, kalkulasi pembacaan beban massa pakan sesaat yang divalidasi oleh load cell, serta metrik status keterhubungan jaringan Wi-Fi menuju server cloud. Kehadiran antarmuka visual lokal ini memberikan garansi keandalan pemantauan sekunder bagi pembudidaya; memungkinkan pengawasan dan inspeksi instrumen secara visual di lapangan tanpa harus bergantung sepenuhnya pada kapabilitas sistem notifikasi jarak jauh (Telegram Bot).

2.2.11 Keypad Matrix

Dalam arsitektur sistem tertanam (embedded system), keypad matrix merupakan instrumen input perangkat keras elektromekanis yang direkayasa untuk memfasilitasi interaksi pengguna secara lokal dengan modul mikrokontroler. Keypad matrix tipe 4×4 terdiri atas 16 buah sakelar taktil (tactile switch atau membrane button) yang dikonfigurasi ke dalam sebuah topologi sirkuit jaringan grid yang mengintegrasikan 4 jalur baris (rows) dan 4 jalur kolom (columns). Tujuan fundamental dari implementasi desain matriks ini adalah untuk mengoptimalkan efisiensi dan penghematan utilisasi pin General Purpose Input/Output (GPIO). Apabila sakelar dikonfigurasi secara diskret, 16 tombol

akan menuntut eksploitasi 16 pin mikrokontroler secara independen. Namun, dengan mengadopsi mekanisme multiplexing pada topologi matriks, sistem secara drastis hanya memerlukan kombinasi 8 buah pin GPIO (4 pin dialokasikan untuk mengendalikan baris dan 4 pin untuk memindai kolom) untuk memetakan seluruh koordinat tombol instruksi tersebut [15].

Prinsip kerja akuisisi data kelistrikan pada keypad matrix dilandaskan pada algoritma pemindaian sekuensial (sequential scanning algorithm) yang dieksekusi oleh program perangkat lunak pada mikrokontroler. Secara konseptual, ESP32 akan memberikan injeksi sinyal logika tegangan rendah (Low atau 0 V) secara bergantian pada setiap jalur baris, seraya secara simultan membaca fluktuasi logika tegangan pada seluruh jalur kolom yang secara default telah dikonfigurasi pada kondisi ditarik ke atas (pull-up atau logika High). Pada saat pengguna memberikan gaya tekan mekanis pada salah satu tombol, interkoneksi fisik antara jalur baris dan jalur kolom pada koordinat tombol tersebut akan terhubung (mengalami short-circuit). Mikrokontroler kemudian akan memvalidasi letak titik persimpangan (intersection) matriks tersebut guna mengidentifikasi nilai karakter spesifik yang ditekan, yang selanjutnya diterjemahkan sebagai parameter instruksi komputasional di dalam program operasional [15].

Dalam integrasi rancang bangun Smart Feeder System, keypad matrix 4×4 didayagunakan sebagai Human-Machine Interface (HMI) lokal secara berdampingan dengan panel layar LCD I2C. Instrumen ini menempati posisi justifikasi operasional yang sangat esensial sebagai subsistem redundansi antarmuka. Meskipun sistem otomasi cerdas ini telah mengakomodasi integrasi API Telegram Bot untuk mengeksekusi kendali telemetri jarak jauh (remote control), ketersediaan panel keypad fisik memastikan bahwa pembudidaya tetap dapat melakukan intervensi fungsional secara langsung di lokasi alat tersebut terpasang.

Melalui antarmuka tombol matriks ini, pembudidaya memiliki otoritas lokal untuk merekalibrasi sensor load cell, memasukkan rentang parameter batas massa pakan harian secara manual, merevisi konfigurasi jadwal pewaktu (timer) pada memori RTC DS3231, maupun mengeksekusi aktuator pelontar secara instan tanpa perlu membebankan ketergantungan pada stabilitas konektivitas jaringan internet

nirkabel (Wi-Fi). Kehadiran fitur komplementer ini secara radikal mampu mendongkrak tingkat keandalan operasional (operational reliability) dan fleksibilitas smart feeder saat diterapkan pada infrastruktur kawasan kolam perikanan yang sering kali memiliki kendala latensi sinyal internet.

2.2.12 Platform IoT (Telegram Bot dan Google Spreadsheet)

Dalam arsitektur Internet of Things (IoT) yang komprehensif, ketersediaan lapisan platform cloud merupakan elemen fundamental yang bertindak sebagai medium perantara (bridge) antara perangkat edge computing (seperti mikrokontroler ESP32 di lokasi kolam) dengan pengguna akhir (end-user). Lapisan platform ini memfasilitasi proses penyerapan data telemetri (data ingestion), penyajian informasi visual, serta eksekusi kendali dari jarak jauh. Guna mereduksi kompleksitas arsitektur dalam membangun server pangkalan data (backend) mandiri dan aplikasi smartphone khusus (native app) yang umumnya menuntut sumber daya pengembangan masif, perancangan Smart Feeder System ini mendayagunakan integrasi hibrida dari dua ekosistem platform cloud publik yang mapan, yakni Application Programming Interface (API) Telegram Bot dan ekosistem Google Spreadsheet. Pemilihan topologi ini direpresentasikan berdasarkan tingkat reliabilitas server komersial yang tinggi, kemudahan aksesibilitas lintas platform, serta efisiensi latensi transmisi data [4].

Telegram Bot merupakan antarmuka pihak ketiga yang disediakan oleh layanan pesan instan Telegram, yang dioperasikan sepenuhnya melalui skrip komputasi alih-alih dikendalikan secara manual oleh agen manusia. Interaksi komunikasi dua arah antara mikrokontroler ESP32 dan server Telegram diimplementasikan menggunakan protokol HTTP/HTTPS yang diamankan dengan enkripsi Transport Layer Security (TLS). Melalui otentikasi sandi keamanan (Bot Token) unik yang diterbitkan oleh sistem BotFather, ESP32 memiliki otorisasi untuk mengirimkan instruksi guna menerima pembaruan pesan pengguna (getUpdates) dengan metode long-polling, maupun mengeksekusi metode sendMessage untuk mendistribusikan notifikasi push secara seketika (real-time). Dalam ekosistem smart feeder ini, antarmuka Telegram difungsikan sebagai konsol Human-Machine Interface (HMI) dinamis jarak jauh. Pembudidaya berhak

memberikan teks perintah (command) spesifik melalui layar smartphone untuk memicu aktuator motor pelontar di luar jadwal, memodifikasi parameter pewaktu (timer), serta menerima laporan konfirmasi bahwa massa pakan telah sukses didistribusikan sesuai kalkulasi load cell [4].

Di sisi lain, guna mengakomodasi kebutuhan perekaman jejak data historis (data logging) operasional harian, sistem ini mengeksploitasi layanan Google Spreadsheet yang terintegrasi secara native dengan lingkungan komputasi awan Google Apps Script (GAS). Keberadaan teknologi Google Apps Script memungkinkan dokumen lembar kerja (spreadsheet) untuk diekspos sebagai aplikasi web (Web App) berspesifikasi Representational State Transfer (REST). Pada mekanisme transmisi datanya, setelah aktuator pelontar merampungkan siklus penyebaran pakan, ESP32 akan menyusun format kompilasi data (payload) ringan, umumnya berbasis JavaScript Object Notation (JSON), yang memuat rentetan parameter esensial seperti timestamp dari RTC, rekapitulasi berat pakan, dan status aktuator. Format paket data ini ditransmisikan melalui permintaan HTTP POST atau HTTP GET menuju URL Web App Google tersebut [16]. Skrip di sisi server (GAS) kemudian akan memproses paket payload tersebut, mengekstrak variabelnya, untuk selanjutnya ditambahkan (append row) secara terstruktur ke dalam baris dan kolom sel pada Google Spreadsheet.

Kolaborasi arsitektural antara Telegram Bot dan Google Spreadsheet ini mewujudkan sebuah ekosistem pemantauan otomatis yang tertutup dan komprehensif. Telegram mengambil peran proaktif dalam manajemen kendali operasional taktis dan penyebaran peringatan (alerting), sementara Google Spreadsheet bertindak sebagai infrastruktur rekam pangkalan data (cloud database) yang persisten. Ketersediaan rekam jejak pada lingkungan Spreadsheet memberikan keuntungan strategis tingkat lanjut bagi pembudidaya; memungkinkan proses audit data lalu lintas logistik pakan, penarikan data secara massal untuk diekspor (exporting), hingga memfasilitasi analisis statistik konversi biomassa guna menunjang pengambilan keputusan bisnis, tanpa menuntut kewajiban biaya operasional server pihak ketiga [16].

2.2.13 Switched-Mode Power Supply (SMPS)

Switched-Mode Power Supply (SMPS) merupakan sebuah unit instrumen catu daya elektronik terintegrasi yang mendayagunakan regulator pensaklaran (switching regulator) frekuensi tinggi untuk mengonversi daya listrik secara komprehensif dan efisien. Berbeda secara fundamental dengan topologi catu daya linier konvensional yang umumnya mendisipasi kelebihan tegangan masukan ke dalam wujud pelepasan panas termal (heat dissipation), SMPS beroperasi dengan memanipulasi rasio siklus kerja (duty cycle) pada komponen transistor daya (seperti Power MOSFET) yang bertindak sebagai sakelar elektronik berkecepatan tinggi. Mekanisme pensaklaran dinamis ini, yang lazimnya berada pada orde puluhan hingga ratusan kilohertz (kHz), memfasilitasi proses penyearahan (rectification) dan penurunan tegangan dari fasa arus bolak-balik (AC) menjadi fasa arus searah (DC) dengan tingkat efisiensi daya yang sangat eskalatif, umumnya melampaui 85%. Tingginya rasio efisiensi ini berimplikasi langsung pada dimensi transformator magnetik yang jauh lebih ringkas, serta reduksi bobot fisik perangkat secara keseluruhan [16].

Secara arsitektural, topologi internal SMPS merangkul beberapa tahapan konversi energi. Tahap awal melibatkan penyearahan langsung dari tegangan jala-jala listrik (AC 220V) menjadi bentuk tegangan DC beramplitudo tinggi. Tegangan DC primer ini kemudian dicacah (chopped) oleh transistor pensaklaran menjadi wujud gelombang kotak frekuensi tinggi, yang selanjutnya direduksi level tegangannya tatkala melewati lilitan sekunder transformator high-frequency. Pada tahap terminal, sinyal tegangan sekunder tersebut disearahkan kembali dan direkayasa menggunakan jaringan filter induktor dan kapasitor berkapasitansi tinggi (LC filter). Eksekusi pemfilteran ini krusial untuk memproduksi keluaran tegangan DC akhir yang sangat halus dengan tingkat riak (low voltage ripple) yang minimal, guna menjaga stabilitas keluaran terlepas dari adanya fluktuasi ekstrem pada beban kerja maupun pada anomali tegangan jala-jala instalasi PLN [16].

Dalam rancang bangun infrastruktur Smart Feeder System, unit SMPS direpresentasikan sebagai hulu atau jantung fundamental dari hierarki distribusi daya kelistrikan alat. Prototipe smart feeder yang diajukan ini menuntut

ketersediaan pasokan arus operasional yang bersifat masif dan fluktuatif, mengingat sistem bertugas mengendalikan aktuator beban induktif berspesifikasi berat, yakni motor DC 775 sebagai pendistribusi gaya sentrifugal dan motor servo MG996R sebagai penggerak katup mekanis penampung pakan. SMPS bertugas penuh untuk mengonversi tegangan listrik grid AC 220V dari fasilitas instalasi kolam budidaya menjadi tegangan DC 12V (atau 24V, bergantung pada spesifikasi motor utama) yang konstan dan berkapasitas arus tinggi.

Tegangan 12V DC dari saluran keluaran SMPS akan didistribusikan melalui dua hierarki jalur utama: sebagian dialirkan secara independen untuk menyuplai energi rotasi eksklusif pada motor DC 775, sementara sebagian daya lainnya direduksi melalui modul buck converter XL4016E1 menjadi tegangan aman 5V DC. Tegangan hasil reduksi inilah yang kemudian diinjeksi untuk mengaktifkan lapisan pemrosesan logika kontrol (mikrokontroler ESP32, modul ADC HX711, keypad, sensor load cell, serta layar penampil LCD). Pemilihan integrasi unit SMPS dengan spesifikasi toleransi arus nominal yang raksasa (misalnya 10 A hingga 30 A) merupakan sebuah kepastian teknis yang tidak dapat direduksi. Kapasitas pengantaran arus masif ini diwajibkan untuk mengakomodasi serapan arus transien kejut (inrush current) yang lazim terjadi dalam rentang sepersekian mikrosekond, tepat pada saat motor pelontar pakan dan motor katup servo diaktivasi secara simultan dari kondisi diam (inersia). Apabila margin arus puncak (peak current) dari unit SMPS tidak memadai, sistem kelistrikan akan mengalami kejatuhan tegangan (voltage drop) yang drastis. Fenomena kejatuhan daya seketika (brown-out) ini secara otomatis akan memicu modul mikrokontroler untuk melakukan reset instruksi paksa secara acak, yang pada gilirannya akan mendisrupsi jadwal algoritma pemberian pakan hingga memicu kegagalan operasional sistem [16].