

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tinjauan Pustaka

Tinjauan terhadap penelitian terdahulu sangat penting untuk memperkuat landasan teoretis dari pengembangan sistem pemantauan hidroponik cerdas yang akan dihasilkan. Melalui penelusuran literatur dalam satu dekade terakhir, terbukti bahwa pemanfaatan *Internet of Things* (IoT), sistem cerdas, dan gamifikasi memberikan dampak signifikan terhadap efisiensi agrikultur. Pemaparan penelitian relevan berikut tidak hanya bertujuan untuk menunjukkan posisi penelitian ini di antara karya ilmiah sebelumnya, tetapi juga menegaskan celah penelitian (*research gap*) yang akan diisi secara komprehensif.

Sebagai landasan sistem IoT, Lakshmanan et al. (2020) telah mengembangkan sistem hidroponik cerdas menggunakan NodeMCU ESP8266 dan berbagai sensor lingkungan. Hasilnya menunjukkan bahwa integrasi IoT mampu mempermudah pemeliharaan tanaman. Namun, sistem pada penelitian tersebut dan mayoritas otomatisasi pertanian cerdas lainnya sangat bergantung pada aktuator mekanis penuh yang terbukti kurang realistis dan tidak ekonomis bagi petani skala kecil maupun pemula (McCampbell, 2022). Keterbatasan biaya aktuator mekanis inilah yang menjadi peluang pengembangan utama. Untuk mengatasi hal tersebut, penelitian ini mengadaptasi kajian Basnayake & Gajendrasinghe (2026) mengenai arsitektur *Human-in-the-Loop* (HITL), di mana perangkat IoT direduksi fungsinya

murni sebagai sistem pemantauan jarak jauh, sementara tindakan pemeliharaan diserahkan kepada manusia sebagai agen aktuator fisik.

Untuk melengkapi keterbatasan pemantauan yang hanya bergantung pada sensor fisik numerik, teknologi sistem cerdas menjadi solusi krusial. Ilham et al. (2023) membuktikan bahwa penerapan sistem cerdas sangat efektif dalam melakukan proses klasifikasi citra digital untuk mendeteksi kondisi anomali atau darurat dengan tingkat akurasi yang tinggi. Jika mayoritas penelitian terdahulu menggunakan model *Machine Learning* yang membutuhkan beban komputasi besar, penelitian ini melakukan simplifikasi terstruktur dengan mengadopsi Sistem Cerdas Berbasis Aturan (*Rule-Based Intelligent System*). Pendekatan ekstraksi ruang warna visual ini (Reza et al., 2023) dinilai lebih ringan dan aplikatif. Lebih jauh, merujuk pada kajian Akbar & Mukhtar (2020), sistem cerdas sangat andal dirancang sebagai mesin penalaran (*knowledge-based*) untuk memberikan rekomendasi solusi terbaik dalam pengambilan keputusan. Konsep tersebut diimplementasikan ke dalam kerangka penalaran Fusi Data Multimodal di penelitian ini, yang menggabungkan data klasifikasi citra dan data sensor lingkungan guna menghasilkan diagnosis kausalitas yang presisi pada tanaman kangkung (*Ipomoea aquatica* F.) secara *real-time*.

Dari sisi interaksi dan retensi pengguna, implementasi *Human-in-the-Loop* memiliki risiko kelalaian manusia. Oleh karena itu, Triantafyllou dan Georgiadis (2022) menegaskan bahwa pendekatan gamifikasi bertujuan utama untuk mendorong keterlibatan pengguna (*user engagement*) secara aktif dan berkelanjutan. Konsep ini didukung kuat oleh Tayal & Rajagopal (2024), yang

menemukan bahwa gamifikasi dalam sektor agrikultur sangat adaptif untuk menyelaraskan tujuan perawatan tanaman dengan preferensi pengguna. Elemen afordans motivasional seperti poin, pencapaian, dan Misi Harian diadopsi ke dalam sistem ini bukan sekadar sebagai hiburan, melainkan sebagai mesin penggerak (katalisator) agar pengguna pemula terstimulasi untuk menjalankan tugasnya sebagai aktuator fisik secara konsisten.

Terakhir, untuk memastikan seluruh instrumen pemantauan IoT tersebut berjalan valid, penelitian Bagus (2024) menunjukkan bahwa keakuratan perangkat keras sangat bergantung pada proses kalibrasi menggunakan regresi linear. Data historis yang tidak terkalibrasi berpotensi menghasilkan prediksi yang menyimpang dari kondisi sebenarnya. Oleh karena itu, metode analisis regresi linear dan evaluasi *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) diterapkan secara disiplin dalam penelitian ini untuk meminimalkan galat pengukuran dan meningkatkan ketepatan mesin aturan fusi data pada perangkat lunak yang dibangun.

2.2. Landasan Teori

Pengembangan sistem cerdas pemantauan pada penelitian ini ditopang oleh beberapa konsep dan landasan keilmuan yang saling terintegrasi. Pembahasan pada landasan teori ini mencakup parameter agronomis budidaya hidroponik, infrastruktur *Internet of Things* (IoT), konsep sistem cerdas dalam klasifikasi citra dan pengambilan keputusan, rekayasa perangkat lunak melalui pendekatan gamifikasi, hingga pemodelan kalibrasi statistik menggunakan metode regresi linear. Pemahaman terhadap seluruh landasan konseptual tersebut diharapkan dapat

menempatkan hasil temuan penelitian ini dalam konteks teoretis dan praktis yang relevan.

2.2.1. Hidroponik dan Syarat Tumbuh Kangkung

Hidroponik merupakan metode budidaya tanaman tanpa media tanah yang memanfaatkan sirkulasi air bernutrisi secara tertutup. Metode ini secara signifikan mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air dan unsur hara, menekan risiko serangan hama atau penyakit, serta menurunkan biaya operasional dalam jangka panjang (Madusari et al., 2020; Wijaya et al., 2025). Salah satu komoditas sayuran daun yang sangat ideal dan adaptif dibudidayakan menggunakan sistem ini di wilayah perkotaan adalah kangkung air (*Ipomoea aquatica*), yang memiliki karakteristik pertumbuhan vegetatif cepat dengan masa panen relatif singkat.

Keberhasilan budidaya kangkung hidroponik sangat bergantung pada stabilitas parameter lingkungan larutan maupun mikro iklim di sekitarnya. Pertumbuhan yang optimal membutuhkan tingkat kepekatan nutrisi di rentang 1050 hingga 1400 ppm, derajat keasaman (pH) antara 5.5 sampai 6.5, serta suhu air yang terjaga pada 20°C hingga 30°C (Rinaldo et al., 2022; Zulkifli et al., 2023). Selain parameter air, kondisi lingkungan udara luar seperti suhu udara ideal di rentang 25°C hingga 35°C serta kelembaban udara (*Relative Humidity*) berkisar antara 60% hingga 80% juga memegang peranan krusial. Fluktuasi suhu udara dan kelembaban yang ekstrem dapat mengganggu laju transpirasi dan mekanisme pembukaan stomata daun, sehingga kemampuan akar untuk menyerap hara akan menurun drastis yang berisiko menyebabkan tanaman menjadi kerdil, tumbuh lambat, atau bahkan gagal panen.

Untuk memastikan seluruh syarat kelayakan tumbuh tersebut terpenuhi secara aktual pada fisik tanaman, evaluasi visual menjadi hal yang sangat krusial. Mengingat pengamatan visual secara manual cenderung subjektif dan rentan kesalahan, maka penelitian ini mengintegrasikan pemantauan fisik tersebut menggunakan sistem cerdas secara non-destruktif. Dalam sistem ini, warna daun dikonversi menjadi parameter kuantitatif yang berfungsi sebagai indikator utama status nutrisi tanaman. Dominasi warna hijau pada citra daun mengindikasikan kecukupan hara (khususnya nitrogen) serta proses fotosintesis yang optimal. Sebaliknya, kemunculan warna kuning (klorosis) menjadi parameter pendeteksi awal adanya stres lingkungan atau defisiensi nutrisi akibat ketidakseimbangan parameter air dan udara sebelumnya. Melalui pemrosesan citra digital, proporsi piksel warna hijau dan kuning tersebut dihitung secara matematis guna menghasilkan klasifikasi skor kesehatan secara otomatis, sehingga pengguna dapat memberikan respons perawatan secara cepat dan tepat.

2.2.2 Internet of Things (IoT) pada Budidaya Tanaman

Perangkat sensor memegang andil krusial dalam menjalankan fungsi pengawasan dan deteksi pada setiap penerapan kekinian dalam ilmu pengetahuan, rekayasa, dan teknologi (Ullo et al., 2021). *Internet of Things* (IoT) dalam domain agrikultur presisi tidak selalu dimanifestasikan dalam bentuk sistem kendali otomatis penuh (*closed-loop control system*) yang melibatkan aktuator mekanis, melainkan dapat diimplementasikan sebagai infrastruktur Jaringan Sensor Nirkabel (*Wireless Sensor Network*) yang berfokus pada pemantauan dan pertukaran data dua arah secara *real-time* (Alviana et al., 2024). Secara arsitektural, sistem IoT bertugas sebagai infrastruktur pengumpul data parameter fisik lingkungan yang

sensitif melalui perangkat *edge node*, kemudian mentransmisikannya ke jaringan awan (*cloud database*) untuk dianalisis dan disajikan langsung pada aplikasi *smartphone* pengguna (Alviana et al., 2024). Pada budidaya sayuran daun seperti kangkung (*Ipomoea aquatica*), pemantauan konsentrasi nutrisi secara berkala merupakan faktor paling krusial karena fase vegetatif tanaman ini sangat sensitif terhadap fluktuasi nilai *Electrical Conductivity* (EC) atau *Total Dissolved Solids* (TDS) di dalam air (Alviana et al., 2024).

Penerapan ekosistem pemantauan berbasis IoT terbukti efektif mengatasi kelemahan manajemen konvensional yang mengandalkan pengukuran manual, di mana petani seringkali mengalami kesulitan dalam menjaga stabilitas kebutuhan hara tanaman secara konsisten (Alviana et al., 2024). Integrasi modul komunikasi nirkabel pada mikrokontroler memungkinkan visualisasi data pertumbuhan tanaman dapat diakses dari jarak jauh tanpa batas ruang dan waktu, sehingga meminimalkan risiko keterlambatan penanganan penambahan nutrisi (Alviana et al., 2024). Dalam penelitian ini, ketiadaan aktuator fisik seperti pompa pengonstruksi nutrisi otomatis disubstitusikan melalui pendekatan interaksi manusia-komputer. Data pembacaan sensor yang tersimpan di dalam *cloud database* tidak hanya disajikan secara pasif, melainkan dimanfaatkan sebagai parameter *input* utama bagi Sistem Cerdas untuk menggerakkan modul Gamifikasi, guna mendorong pengguna bertindak sebagai aktuator mandiri di lapangan.

A. Perangkat Keras (*Hardware*) Sistem IoT

a. ESP32

ESP32 merupakan mikrokontroler *System-on-a-Chip* (SoC) yang bertindak sebagai pusat kendali IoT. Dilengkapi fitur Wi-Fi dan Bluetooth terintegrasi, perangkat ini bertugas mengakuisisi sinyal dari seluruh sensor, memprosesnya, lalu mentransmisikan data tersebut ke *cloud* (Firebase) secara *real-time*. ESP32 dipilih karena keandalannya dalam mengelola komunikasi jaringan dan memicu interaksi pada sistem hidroponik (Hercog et al., 2023; Rohman et al., 2025).



Gambar 2.1 Mikrokontroler ESP32 Development Board

Sumber: (Hercog, D., Lerher, T., Truntiĉ, M., & Težak, O., 2023)

b. DS18B20

DS18B20 adalah sensor suhu digital kedap air dengan presisi tinggi ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$). Pada sistem hidroponik, sensor ini sangat krusial untuk memantau suhu larutan nutrisi secara berkelanjutan, mengingat fluktuasi suhu air memengaruhi tingkat kelarutan oksigen serta efisiensi penyerapan hara oleh perakaran tanaman kangkung (Rohman et al., 2025).



Gambar 2.2 DS18B20

Sumber: Flyrobo

c. DHT22

DHT22 adalah sensor pembaca suhu dan kelembaban udara relatif (*Relative Humidity / RH*). Pemantauan kedua parameter udara ini sangat penting untuk menciptakan mikroklimat lingkungan yang ideal, mengendalikan laju transpirasi daun, serta meminimalisir risiko penyakit jamur akibat kelembaban yang terlalu tinggi (Hercog et al., 2023).



Gambar 2.3 DHT22

Sumber: Kuongshun

d. TDS Meter

Sensor TDS (*Total Dissolved Solids*) digunakan untuk mengukur kepekatan nutrisi terlarut dalam satuan ppm (*parts per million*). Parameter ini merupakan acuan utama untuk mendeteksi ketersediaan unsur hara riil di tandon, sehingga pengguna dapat memvalidasi presisi konsentrasi nutrisi agar tidak berada di luar ambang batas ideal (Rohman et al., 2025).



Gambar 2.4 TDS Meter

Sumber: Digiware

e. PH-4502C

Sensor PH-4502C berfungsi mengukur tingkat keasaman atau kebasaan larutan nutrisi (skala 0-14). Menjaga kestabilan pH di rentang ideal (5.5 - 6.5 untuk kangkung) sangat vital. Jika pH tidak sesuai, nutrisi berpotensi mengendap dan gagal diserap oleh akar tanaman meskipun nilai kepekatan TDS terpantau mencukupi (Rohman et al., 2025).



Gambar 2.5 PH-4502C

Sumber: AB Maker

f. Growlight

Growlight adalah lampu LED khusus dengan kombinasi spektrum warna merah dan biru yang diaplikasikan pada instalasi ruangan tertutup (*indoor*). Komponen ini bertindak sebagai substitusi cahaya matahari untuk mengoptimalkan energi fotosintesis dan penyerapan klorofil pada tanaman.



Gambar 2.6 Growlight

Sumber: LoveThatLeaf

g. Pompa Air *Submersible*

Pompa benam (*submersible*) berdaya rendah dan rendah kebisingan ini dirancang untuk beroperasi secara kontinu selama 24 jam. Fungsinya adalah menjaga sirkulasi larutan air nutrisi ke seluruh area perakaran agar pasokan oksigen terlarut dan distribusi hara tetap merata (Supriadi et al., 2021).



Gambar 2.7 Pompa Air Submersible
Sumber: (Supriadi, D., & T., T, 2021)

B. Karakteristik Akurasi dan Kalibrasi Sensor

Akurasi sensor menunjukkan tingkat kedekatan hasil pengukuran perangkat elektronik terhadap nilai referensi aktual yang benar. Sensor dengan tingkat akurasi tinggi mampu menyediakan data yang konsisten dan representatif terhadap kondisi riil di lapangan. Namun, dalam implementasinya, data mentah (*raw data*) yang dihasilkan sensor rentan mengalami penyimpangan akibat toleransi manufaktur, penuaan komponen, ataupun faktor fluktuasi lingkungan (Bagas, 2024).

Oleh karena itu, diperlukan proses kalibrasi, yaitu prosedur penyesuaian keluaran sensor terhadap nilai acuan standar yang telah divalidasi untuk meminimalkan kesalahan sistematis. Dalam sistem *monitoring* berbasis IoT, kalibrasi memegang peranan vital karena akurasi data historis sensor menjadi penentu utama dalam validitas pemodelan analisis data (seperti algoritma regresi linier). Tanpa proses kalibrasi yang terukur, data yang masuk ke sistem berpotensi bias, yang pada gilirannya akan menurunkan keandalan pengambilan keputusan prediktif pada sistem cerdas yang dibangun (Bagas, 2024).

C. Infrastruktur *Cloud Computing* dan Firebase

Cloud computing memainkan peran besar dalam meningkatkan kapabilitas sistem IoT melalui penyediaan skalabilitas, fleksibilitas komputasi, serta keandalan penyimpanan data. Dengan memanfaatkan fasilitas awan (*cloud*), perangkat IoT dengan spesifikasi komputasi terbatas dapat memindahkan beban kerja berat seperti penyimpanan data historis volume besar, pemrosesan

algoritma, dan analisis data intensif menuju server jarak jauh yang memiliki performa tinggi (Efendi et al., 2025).

Dalam penelitian ini, platform *cloud* yang diintegrasikan adalah Firebase dari Google. Firebase menyajikan layanan *database* berbasis *Realtime Database* yang memungkinkan perangkat IoT menyelaraskan informasi secara instan tanpa tunda antara perangkat keras (ESP32) dan sistem aplikasi pengguna. Sinkronisasi seketika ini sangat krusial bagi skenario pemantauan yang membutuhkan pembaruan informasi sensor serta notifikasi kondisi anomali lingkungan secara cepat. Selain itu, Firebase telah dilengkapi dengan protokol verifikasi identitas dan manajemen hak akses terenkripsi untuk memastikan keamanan transmisi data sistem IoT dari ancaman luar (Efendi et al., 2025).

2.2.3 Sistem Cerdas Klasifikasi Citra dalam Pemantauan Tanaman

Sistem cerdas merupakan cabang kecerdasan buatan yang memungkinkan komputer untuk meniru kemampuan kognitif manusia dalam mengekstraksi, menganalisis, dan mengambil keputusan secara objektif. Dalam pemantauan visual terkomputerisasi, pendekatan sistem cerdas diimplementasikan untuk menangani ketidakpastian dan ambiguitas yang sering muncul pada fitur citra di dunia nyata (Keller et al., n.d.). Berdasarkan penelitian Ilham et al. (2023), penerapan sistem cerdas terbukti sangat efektif dalam melakukan proses klasifikasi citra digital untuk mendeteksi kondisi anomali dengan presisi dan cepat. Dalam agrikultur cerdas, karakteristik visual daun khususnya perubahan warna dari hijau menjadi kuning (klorosis) digunakan sebagai indikator

objektif untuk mengevaluasi status nutrisi dan kesehatan tanaman secara *real-time* (Wang et al., 2024). Integrasinya dengan *Internet of Things* (IoT) memungkinkan penyesuaian parameter lingkungan secara responsif guna mendukung pertanian presisi (Hanafi et al., 2025). Mengacu pada hierarki arsitektur kecerdasan buatan pada pemrosesan visual, alur klasifikasi klorosis ini dikondensasikan ke dalam tiga tingkatan pemrosesan:

1. Pemrosesan Tingkat Rendah (*Low-Level Processing*) dan Pra-Pemrosesan Citra

Pemrosesan tingkat rendah berfokus pada manipulasi piksel untuk meningkatkan kualitas citra dan mereduksi gangguan cahaya luar (*variable illumination*). Karena representasi citra RGB sangat rentan terhadap bayangan dan fluktuasi cahaya ruang terbuka, citra dikonversi ke dalam ruang warna HSV (*Hue, Saturation, Value*) (Abbasi et al., 2023; Yang et al., 2015). Konversi ini mengisolasi warna murni (*Hue*), di mana berdasarkan standar komputasi, warna hijau daun sehat diisolasi pada rentang $H = [40, 80]$, sedangkan warna kuning indikator klorosis dipetakan secara presisi pada $H = [20, 30]$ (Zidanul Akbar et al., 2025; Rizka et al., 2025). Tahap ini juga mencakup operasi morfologi untuk membersihkan *noise* sebelum masuk ke tahap segmentasi.

2. Pemrosesan Tingkat Menengah (*Mid-Level Processing*) dan Ekstraksi Fitur

Tahap ini mengubah piksel menjadi struktur geometri objek melalui segmentasi. Untuk mengatasi masalah daun yang saling berhimpitan (*overlapping*), digunakan algoritma *Watershed* yang memperlakukan

intensitas piksel layaknya topografi untuk mencari batas pemisah objek secara akurat (Wu & Li, 2022). Setelah objek daun terpisah, teknik *masking* (*in-range filtering*) diterapkan untuk menghasilkan citra biner. Hal ini memungkinkan ekstraksi fitur secara kuantitatif untuk menghitung total area daun. Berdasarkan metode fitopatologi, tingkat keparahan klorosis (S) diekstraksi melalui nilai pembagian antara jumlah piksel daun menguning (P_d) terhadap total piksel seluruh daun (P_l) (Patil & Bodhe, 2011; Samanta et al., 2025), dengan persamaan:

$$S = \left(\frac{P_d}{P_l} \right) \times 100\%$$

3. Penalaran Kontekstual Sistem Cerdas dan Fusi Data Multimodal

Tahap puncak ini berfokus pada interpretasi semantik tingkat lanjut, di mana hasil ekstraksi visual dari citra dikombinasikan secara simultan dengan parameter lingkungan fisik dari perangkat keras IoT (fusi data multimodal). Merujuk pada kajian Akbar & Mukhtar (2020), fungsionalitas utama dari sebuah sistem cerdas terletak pada kemampuannya memproses berbagai variabel data menjadi sebuah mesin penalaran (*knowledge-based*) untuk menghasilkan keputusan yang akurat. Oleh karena itu, pendekatan sistem cerdas berbasis aturan digunakan untuk mengubah parameter kuantitatif yang masih kaku menjadi representasi label linguistik yang bermakna, sehingga mampu meniru kemampuan kognitif pakar pertanian dalam menginterpretasikan kondisi objek secara kontekstual.

Lapisan keputusan otonom ini mengintegrasikan hasil validasi makro berbasis jarak *Euclidean* (Abbasi et al., 2023) dan kategorisasi mikro

skala keparahan klorosis (Patil & Bodhe, 2011) dengan lima parameter sensor eksternal, yaitu derajat keasaman (pH), kepekatan nutrisi (TDS), kelembapan udara, suhu air, serta suhu udara. Penarikan kesimpulan berbasis pohon keputusan (*rule-based decision tree*) tidak hanya menghasilkan label kesehatan visual tanaman seperti klorosis ringan (0%–25%), sedang (26%–50%), dan parah (>50%), melainkan mengeksekusi analisis kausalitas klinis (diagnosis penyebab).

Sebagai contoh, jika algoritma mendeteksi klorosis sedang yang dibarengi dengan representasi data sensor TDS di bawah 1050 ppm, mesin penalaran secara cerdas menarik kesimpulan semantik berupa "Defisiensi Nutrisi Makro". Sebaliknya, jika gejala klorosis terdeteksi pada nilai TDS normal namun suhu air melebihi 30°C, keputusan semantik yang dihasilkan adalah "Stres Termal Radikal". *Output* keputusan diagnosis klinis komprehensif inilah yang bertindak sebagai landasan sistem cerdas dalam mendistribusikan umpan balik (*feedback*) perawatan spesifik kepada pengguna, sekaligus menggerakkan skema penugasan interaktif di dalam modul gamifikasi.

2.2.4 Gamifikasi dalam Aplikasi Monitoring Hidroponik

Gamifikasi merujuk pada penerapan elemen-elemen desain permainan ke dalam konteks non-permainan dengan tujuan utama untuk meningkatkan motivasi, kolaborasi, dan keterlibatan pengguna (*user engagement*). Integrasi elemen seperti poin pengalaman (EXP), mata uang virtual (Koin), sistem level, dan misi harian mampu mengubah aktivitas rutin seperti pemantauan tanaman yang kaku menjadi

pengalaman yang interaktif dan menyenangkan. Dalam sistem monitoring, pola desain gamifikasi berfungsi mempertahankan minat pengguna pada tiga fase utama: pengalaman pemula untuk menarik minat (*onboarding*), pengalaman sosial untuk interaksi, dan keterlibatan berulang agar pengguna rutin mengecek aplikasi (*retention*) (Putra et al., 2024; Triantafyllou et al., 2022).

Keberhasilan gamifikasi sangat bergantung pada pendekatan psikologis dan teori motivasi yang mendasarinya. Dalam konteks aplikasi *smart farming*, desain gamifikasi dibangun di atas beberapa landasan teori berikut:

1. Teori Motivasi Intrinsik dan Ekstrinsik

Motivasi merupakan penggerak utama keterlibatan individu. Motivasi intrinsik berasal dari rasa ingin tahu dan kepuasan pribadi, sedangkan motivasi ekstrinsik dipicu oleh rangsangan luar seperti hadiah. Gamifikasi yang baik harus mampu menyeimbangkan pemberian elemen ekstrinsik (seperti skor atau lencana aplikasi) untuk memancing dan mempertahankan minat intrinsik pengguna. Jika diseimbangkan dengan baik, pengguna tidak akan merasa bosan dan performa pemantauan tanaman tidak akan menurun seiring waktu (Rismayanti et al., 2023).

2. Teori Belajar Behavioristik

Teori ini menitikberatkan pada perubahan tingkah laku nyata melalui mekanisme penguatan (*reinforcement*). Dalam gamifikasi, pemberian stimulus positif (berupa hadiah Koin atau EXP setelah mengecek sensor) akan memperkuat respon pengguna untuk terus melakukan pemantauan. Mekanisme stimulus-respon ini secara perlahan akan

membentuk perilaku positif dan kebiasaan (*habit*) pengguna dalam merawat tanaman hidroponik secara terstruktur (Suputra, 2023).

3. Teori Motivasi Berprestasi McClelland David

McClelland membagi motivasi ke dalam kebutuhan akan prestasi (*nAch*), kekuasaan (*nPow*), dan afiliasi (*nAff*). Kebutuhan akan prestasi (*nAch*) mendorong individu untuk berhasil mencapai target. Dalam sistem monitoring hidroponik, teori ini diaktualisasikan melalui tantangan "Misi Harian" dan peningkatan "Level Akun" (misalnya dari level Pemula hingga Master). Fitur ini mawadahi hasrat pengguna untuk mencapai standar pertumbuhan tanaman tertentu melalui evaluasi kinerja yang terukur (Ridho, 2020).

4. Kerangka Kerja *Octalysis*

Ketiga teori psikologi di atas dirangkum secara aplikatif dalam kerangka kerja *Octalysis*, yang memiliki delapan penggerak utama motivasi, di antaranya *epic meaning* (makna epik) dan *accomplishment* (pencapaian). Penggunaan elemen gamifikasi tidak secara otomatis menyenangkan jika tidak didesain untuk memberi makna. Oleh karena itu, integrasi status riil tanaman dengan jadwal penghargaan (*reward schedule*) pada aplikasi didesain khusus agar pengguna merasa sedang melakukan misi penting yang membangkitkan gairah penyelesaian (Triantafyllou et al., 2022).

Melalui integrasi landasan teori tersebut, penerapan gamifikasi dalam sistem hidroponik berbasis IoT bertujuan mengubah aktivitas pemantauan yang repetitif menjadi proses yang bermakna. Umpan balik instan dari data sensor yang dikonversi menjadi poin atau pencapaian akan memotivasi pengguna untuk

melakukan pengecekan harian (*daily check*). Hal ini pada akhirnya akan memastikan keberlanjutan produksi tanaman kangkung, menjaga akurasi data sistem pertanian presisi, dan meningkatkan literasi pertanian secara signifikan bagi pengguna pemula (Oberoi et al., 2023).

2.2.5 Aplikasi *Mobile* sebagai Mesin Penalaran Sistem Cerdas

Aplikasi *mobile* dalam arsitektur penelitian ini tidak hanya berfungsi sebagai antarmuka pengguna (*user interface*) pasif yang menyajikan visualisasi data sensor secara *real-time*, melainkan bertindak sebagai mesin penalaran (*inference engine*) utama dari ekosistem sistem cerdas. Melalui platform ini, pengguna dapat memantau parameter krusial seperti suhu lingkungan, kelembapan, dan tingkat pH air secara mudah, di mana data mentah dari sensor diubah menjadi tampilan grafis yang informatif untuk mendukung pengambilan keputusan. Efektivitas aplikasi ini diperkuat melalui integrasi teknologi *Internet of Things* (IoT) sebagai jalur transmisi data nirkabel, serta penggunaan algoritma **Sistem Cerdas klasifikasi citra** untuk melakukan pemrosesan gambar digital guna mendeteksi kondisi kesehatan fisik daun secara non-destruktif (Rofiansyah et al., 2023).

Penerapan fitur terpadu seperti sistem poin, toko virtual (*virtual store*), misi harian (*daily missions*), serta pemberian *reward* berdasarkan hasil diagnosis klinis **oleh sistem cerdas**, bertujuan untuk mengubah aktivitas pemantauan rutin menjadi proses yang interaktif dan menyenangkan. Strategi antarmuka ini terbukti efektif untuk memotivasi pengguna agar bersedia menjalankan perannya sebagai aktuator

dalam memelihara sistem hidroponik secara konsisten dan berkelanjutan (Rofiansyah et al., 2023).

Dalam proses pengembangan antarmuka dan sistem logika aplikasi *mobile* tersebut, salah satu teknologi yang andal untuk digunakan adalah *framework* Flutter. Flutter merupakan sebuah kerangka kerja multiplatform yang dikembangkan oleh tim Google, yang bertujuan untuk menyederhanakan pengembangan perangkat lunak lintas platform hanya dengan menggunakan satu basis kode (*single codebase*). Keunggulan utama yang membedakan Flutter dengan pendekatan multiplatform lainnya adalah Flutter tidak menggunakan sistem penyambung (*bridge*), melainkan mengimplementasikan kodenya secara hierarkis menggunakan komponen yang disebut *widget*. Komponen *widget* ini dapat berupa elemen visual maupun sekadar wadah penampung bagi *widget* lainnya, sehingga satu basis kode sudah sangat memadai untuk membangun antarmuka pengguna yang kompleks sekaligus mengeksekusi logika mesin aturan sistem cerdasnya di balik layar (Kamil et al., 2023).

Secara arsitektur, Flutter terdiri dari dua komponen penting, yakni *UI Framework* yang berisi berbagai komponen antarmuka seperti navigasi, teks, dan tombol, serta *Software Development Kit* (SDK) yang berfungsi sebagai alat bantu bagi pengembang untuk merancang aplikasi. Dalam pembuatan aplikasi menggunakan Flutter, pengembang hanya perlu mempelajari satu bahasa pemrograman, yaitu Dart. Dart merupakan bahasa pemrograman terstruktur bersifat *open source* yang diciptakan oleh Google. Bahasa ini menggunakan sistem *static typing* dan memiliki sintaksis yang sangat mudah dipelajari karena memiliki banyak

kemiripan fundamental dengan bahasa pemrograman populer lainnya seperti Java dan JavaScript (Kamil et al., 2023).

2.2.6 Regresi Linier dan Model Kalibrasi (R^2 , MAE, dan MAPE)

Dalam pengembangan sistem *Internet of Things* (IoT) yang melibatkan pemantauan parameter fisik atau kimia, akurasi data yang dihasilkan oleh sensor merupakan faktor krusial. Oleh karena itu, diperlukan sebuah metode kalibrasi matematis serta evaluasi pengukurannya menggunakan regresi linier.

1. Regresi Linier

Regresi linier adalah metode statistik yang digunakan untuk memodelkan hubungan antara variabel terikat (dependen) dan satu atau lebih variabel bebas (independen). Dalam konteks kalibrasi sensor hidroponik, regresi linier sederhana digunakan untuk menemukan hubungan matematis antara nilai mentah yang dibaca oleh sensor (sebagai variabel independen, x) dan nilai aktual yang ditunjukkan oleh instrumen ukur standar (sebagai variabel dependen, y).

Tujuan utama dari metode ini adalah untuk menemukan garis lurus terbaik (*line of best fit*) yang meminimalkan selisih antara data aktual dan data prediksi.

Persamaan regresi linier sederhana dirumuskan sebagai:

$$y = bx + a$$

Keterangan:

y = Nilai referensi

x = Nilai pembacaan sensor

b = Koefisien regresi atau slope

a = Konstanta atau intercept

Melalui persamaan ini, setiap nilai mentah yang masuk dari mikrokontroler dapat dikoreksi secara *real-time* di dalam sistem perangkat lunak untuk menghasilkan pembacaan yang presisi (Kumari & Yadav, 2018).

2. Koefisien Determinasi (R^2)

Untuk mengevaluasi seberapa baik model regresi linier tersebut, digunakan Koefisien Determinasi atau sering disimbolkan dengan R^2 . Koefisien determinasi adalah proporsi dari total variasi pada variabel dependen yang dapat dijelaskan oleh variasi pada variabel independen. Nilai batas atas dari koefisien determinasi adalah 1, yang mana nilai tersebut menunjukkan tingkat kecocokan prediksi (*fit*) yang sempurna. Jika R^2 bernilai 1, maka terdapat hubungan linier yang sempurna antara x dan y , yang berarti 100% variasi pada nilai y dapat dijelaskan oleh variasi pada x . Nilai R^2 yang tinggi secara absolut mengindikasikan performa model regresi yang sangat baik, terlepas dari rentang distribusi nilai data sebenarnya (Chicco et al., 2021).

Nilai R^2 berkisar antara 0 hingga 1 (atau 0% hingga 100%).

1. Nilai R^2 yang mendekati 1 mengindikasikan bahwa model regresi sangat sesuai dengan data; artinya, sensor memiliki tingkat linieritas yang sangat tinggi dan merespon perubahan nilai secara konsisten terhadap alat standar.
2. Nilai R^2 yang mendekati 0 menunjukkan bahwa tidak ada korelasi linier yang kuat, yang bisa mengindikasikan bahwa sensor mengalami *noise* yang tinggi, rusak, atau memiliki karakteristik respons non-linier yang membutuhkan metode kalibrasi lain.

Dalam pengujian perangkat keras sistem pemantauan, pencarian nilai variabel b, c, serta pengujian metrik R^2 ini menjadi parameter utama untuk memvalidasi kelayakan sensor sebelum sistem diimplementasikan secara penuh pada instalasi hidroponik.

3. *Mean Absolute Error (MAE)*

Selain koefisien determinasi, *Mean Absolute Error (MAE)* juga merupakan bagian dari metrik untuk mengevaluasi kualitas kecocokan model regresi yang diukur berdasarkan jarak antara nilai regresi terhadap titik data latih aktual. Secara matematis, formulasi MAE didefinisikan sebagai:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

Keterangan:

n = Jumlah sampel data

$\sum_{i=1}^n$ = Total data

y_i = Nilai aktual

$\hat{y}_i$ = Nilai prediksi

$|y_i - \hat{y}_i|$ = Nilai absolut selisih

Nilai terbaik untuk MAE adalah 0 yang berarti regresi sempurna, sedangkan nilai terburuknya adalah tak terhingga. Metrik MAE ini sangat tepat digunakan apabila data yang diukur berpotensi memiliki bagian yang rusak atau berupa pencilan (*outlier*), karena perhitungan MAE tidak memberikan penalti yang terlalu besar terhadap titik-titik pencilan tersebut (Chicco et al., 2021).

4. *Mean Absolute Percentage Error (MAPE)*

Metrik evaluasi model regresi lainnya yang umum digunakan adalah *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), yang memberikan interpretasi hasil evaluasi secara sangat intuitif dalam bentuk kesalahan relatif. Penggunaan MAPE sangat direkomendasikan pada pengujian instrumen di mana sensitivitas terhadap variasi secara relatif dinilai jauh lebih penting dibandingkan dengan variasi secara absolut. Secara matematis, formulasi MAE didefinisikan sebagai:

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|$$

Keterangan:

n = Jumlah sampel data

y_i = Nilai aktual

$\hat{y}_i$ = Nilai prediksi

Sebagaimana MAE, nilai sempurna untuk MAPE adalah 0, dan terburuk adalah tak terhingga. Meskipun memiliki kelebihan pada pengukuran relatif, penggunaan MAPE harus memperhatikan beberapa kelemahan, yaitu penggunaannya yang terbatas secara definisi hanya pada rentang data yang bernilai positif saja, serta cenderung menjadi bias terhadap hasil peramalan atau prediksi regresi yang bernilai rendah (Chicco et al., 2021).

2.2.7 System Usability Scale (SUS)

System Usability Scale (SUS) merupakan salah satu metode penilaian *usability* yang digunakan untuk menilai kelayakan suatu sistem serta menilai pelayanannya. Metode SUS ini dikembangkan pada tahun 1986 sebagai sebuah alat pengujian *usability*. Tujuan utama dari penggunaan SUS adalah untuk memberikan penilaian yang objektif dan efisien terhadap tingkat kemudahan penggunaan suatu

sistem. Dengan kemampuannya tersebut, hasil pengukuran SUS dapat menjadi acuan yang sangat baik dalam proses pengembangan dan perbaikan sistem.

1. Karakteristik dan Butir Pertanyaan SUS

Dalam pelaksanaannya, SUS menggunakan kuesioner sebagai alat pengukuran *usability* yang terdiri dari 10 butir pertanyaan yang disusun berdasarkan sudut pandang dan pengalaman pengguna. Pengguna yang menjadi responden dapat memberikan tanggapannya berdasarkan 5 poin skala Likert yang telah disediakan pada kuesioner (Pratama et al., 2024).

2. Interpretasi Skor SUS

Terdapat metode khusus untuk menentukan kualitas dari skor SUS yang telah dikalkulasikan. Penilaian ini didasarkan pada tingkat penerimaan pengguna (*acceptability*), *grade* skala, dan penilaian adjektif (*adjective rating*).

Tingkat Penerimaan (*Acceptability*): Tingkat penerimaan pengguna dibagi ke dalam tiga kategori, yaitu *not acceptable* (tidak dapat diterima), *marginal* (batas ambang), dan *acceptable* (dapat diterima).

Grade Skala: *Grade* skala pada perhitungan SUS dibagi menjadi enam tingkatan huruf, yaitu A, B, C, D, E, dan F.

Penilaian Adjektif (*Adjective Rating*): Penilaian deskriptif ini meliputi kategori: *worst imaginable* (terburuk), *poor* (buruk), *ok* (cukup), *good* (baik), *excellent* (sangat baik), dan *best imaginable* (terbaik).

Ketiga indikator interpretasi tersebut saling berkesinambungan untuk menyimpulkan apakah sebuah sistem sudah mencapai tingkat kelayakan *usability* yang baik atau masih memerlukan iterasi perbaikan lebih lanjut (Pratama et al., 2024).