

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertanian perkotaan atau urban farming merupakan salah satu solusi strategis dalam menghadapi tantangan ketahanan pangan di wilayah perkotaan yang mengalami pertumbuhan populasi yang pesat. Septya et al (2022) dalam penelitiannya mengungkapkan bahwa meningkatnya ketidakstabilan pasokan pangan di kawasan urban mendorong perlunya pengembangan sistem produksi pangan lokal yang lebih mandiri dan berkelanjutan (Septya et al., 2022). Dalam praktiknya, urban farming memungkinkan masyarakat memanfaatkan ruang terbatas seperti pekarangan rumah, *rooftop*, maupun lahan sempit lainnya untuk budidaya tanaman hortikultura, termasuk selada yang memiliki siklus panen relatif cepat dan permintaan pasar yang tinggi.

Dalam kegiatan budidaya tanaman, ketersediaan air menjadi faktor penting yang mempengaruhi pertumbuhan dan produktivitas tanaman. Pengelolaan penyiraman yang tidak tepat dapat menyebabkan tanaman mengalami stres air yang berdampak pada penurunan kualitas dan hasil panen. Penelitian Azzani (2023) menunjukkan bahwa penerapan sistem irigasi tetes (*drip irrigation*) mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air karena air dialirkan langsung ke area perakaran tanaman secara terkontrol. Metode ini dinilai lebih efektif dibandingkan penyiraman konvensional karena dapat mengurangi kehilangan air akibat penguapan maupun limpasan (Azzani, 2023).

Namun demikian, implementasi sistem irigasi pada skala urban farming di Indonesia masih menghadapi berbagai kendala. Khasanah (2021) mencatat bahwa sebagian besar pelaku pertanian skala kecil masih menggunakan metode penyiraman manual yang kurang efisien dalam penggunaan air dan tenaga kerja. Selain itu, beberapa sistem irigasi yang telah dikembangkan umumnya menggunakan instalasi pipa berukuran besar atau pompa dengan kebutuhan daya relatif tinggi sehingga kurang praktis untuk diterapkan pada skala rumah tangga maupun pelaku usaha mikro kecil menengah atau UMKM (Khasanah, 2021). Kondisi ini menunjukkan adanya kebutuhan akan sistem irigasi yang lebih sederhana, hemat energi, serta mudah diadopsi oleh masyarakat.

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem irigasi tetes berbasis IoT. Kusumawardani et al. (2019) mengembangkan sistem irigasi tetes untuk tanaman jeruk yang dikendalikan menggunakan sensor kelembapan tanah sehingga penyiraman dapat dilakukan secara otomatis ketika kelembapan tanah berada di bawah batas tertentu (Kusumawardani et al., 2019). Penelitian lain yang dilakukan oleh Azzani (2023) merancang sistem irigasi tetes berbasis IoT untuk tanaman selada menggunakan mikrokontroler STM32 dan NodeMCU ESP8266 untuk memantau suhu dan kelembapan tanah (Azzani, 2023). Selain itu, Walidain mengembangkan sistem kendali kadar air tanah dan monitoring suhu tanah berbasis IoT pada sistem irigasi tetes untuk meningkatkan efisiensi pengelolaan tanaman (Walidain, 2024). Penelitian yang dilakukan oleh Fauzi dan Amarudin juga menunjukkan bahwa integrasi ESP32 dengan protokol komunikasi IoT mampu mendukung sistem monitoring dan kontrol irigasi tetes secara *real-time* melalui aplikasi berbasis web (Fauzi & Amarudin, 2025).

Meskipun berbagai penelitian tersebut telah menunjukkan keberhasilan penerapan sistem irigasi tetes berbasis IoT, sebagian besar sistem masih menggunakan konfigurasi distribusi air dengan tekanan relatif tinggi serta pompa air bertegangan besar untuk menghasilkan aliran air yang stabil pada jaringan irigasi. Hal ini menyebabkan konsumsi energi yang lebih besar serta meningkatkan kompleksitas instalasi sistem. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan perancangan sistem irigasi tetes berbasis ESP32 yang menggunakan arsitektur irigasi tetes dengan pompa air bertegangan 5 V. Pendekatan ini diharapkan mampu menghasilkan sistem irigasi yang lebih sederhana, hemat energi, dan mudah diimplementasikan pada praktik urban farming skala kecil maupun usaha mikro di bidang pertanian.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana merancang dan membangun sistem irigasi tetes berbasis ESP32 dengan kontrol debit air untuk mendukung urban farming?
2. Bagaimana kinerja sistem irigasi tetes dalam menghasilkan distribusi air yang merata dan andal pada skala rumah tangga?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah target spesifik yang ingin dicapai untuk menjawab rumusan masalah. Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Merancang dan membangun sistem irigasi tetes otomatis berbasis ESP32 dengan kontrol debit air untuk mendukung penerapan urban farming.
2. Mengevaluasi kinerja sistem dalam menghasilkan distribusi air yang merata dan andal pada sistem irigasi tetes skala rumah tangga.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian adalah dampak atau kontribusi positif yang diharapkan dari tercapainya tujuan penelitian. Manfaatnya dapat dibagi menjadi beberapa kategori yaitu:

1. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan di bidang sistem kendali dan IoT, khususnya pada perancangan sistem irigasi tetes berbasis mikrokontroler ESP32 dengan pengaturan tekanan dan debit air.
2. Bagi masyarakat atau pelaku urban farming, sistem yang dikembangkan dapat membantu pengelolaan penyiraman tanaman secara otomatis, sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan air dan waktu.
3. Bagi pengembang sistem IoT, penelitian ini dapat menjadi contoh implementasi integrasi sensor, aktuator, dan komunikasi MQTT dalam sistem monitoring dan kontrol berbasis jaringan.
4. Bagi institusi pendidikan, penelitian ini dapat dijadikan sebagai referensi dalam pengembangan sistem otomasi pertanian berbasis mikrokontroler.

1.5 Ruang Lingkup

Agar penelitian ini berjalan lebih terarah dan sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan, maka penelitian ini memiliki cakupan pembahasan sebagai berikut:

1. Sistem dirancang khusus untuk tanaman selada dalam skala rumah tangga (18 pot).
2. Penelitian berfokus pada perancangan dan pembangunan sistem irigasi tetes berbasis ESP32 untuk aplikasi urban farming.
3. Pengendalian irigasi dilakukan secara otomatis berdasarkan parameter kelembapan tanah yang dibaca oleh sensor *soil moisture*.
4. Sistem monitoring dan kontrol diimplementasikan menggunakan komunikasi berbasis IoT melalui protokol MQTT.
5. Pengujian sistem meliputi akurasi sensor, respons aktuator (pompa), distribusi debit air pada *dripper*, serta stabilitas komunikasi data.
6. Sistem menggunakan 1 sensor representatif dengan asumsi kondisi tanah homogen antar pot

1.6 Teori

1.6.1 Urban Farming

Urban farming merupakan praktik bertani di kawasan perkotaan dengan memanfaatkan ruang terbatas untuk memenuhi kebutuhan pangan secara mandiri, mulai dari pekarangan rumah hingga area komunitas (Yunita et al., 2023). Selain berfungsi sebagai sarana produksi pangan cepat panen, seperti melalui budidaya *microgreen*, urban farming juga dapat menjadi media yang mengintegrasikan berbagai elemen sains dan ekologi dalam skala kecil. Penelitian Andani dan Benny (2024) menunjukkan bahwa desain infrastruktur yang efisien, seperti penerapan siklus air tertutup dan penggunaan material ramah lingkungan, sangat berperan dalam keberlanjutan akses pangan perkotaan, menjadikan urban farming adaptif terhadap dinamika kota yang cepat berubah (Andani & Benny, 2024).



Gambar 1 Urban Farming *Microgreen*

Sumber: Yunita et al (2023)

Contoh penerapan urban Farming dapat dilihat pada Gambar 1 yang menggunakan metode *microgreen*. Secara makro, urban farming menjadi solusi penting dalam menghadapi tantangan urbanisasi dan konversi lahan pertanian yang mempersempit ruang hijau produktif (Gultom & Harianto, 2022). Strategi ini berfokus pada pemendekan rantai pasok pangan dan pengurangan ketergantungan kota terhadap

pasokan eksternal, dengan mengoptimalkan kapasitas produksi lokal (Cellindita, 2024). Dengan demikian, urban farming tidak hanya sebagai gerakan ekologis, tetapi juga kunci untuk menciptakan kemandirian pangan perkotaan yang berkelanjutan dan adaptif.

1.6.2 Selada

Selada (*Lactuca sativa* L.) merupakan komoditas hortikultura bernilai ekonomis tinggi yang kaya akan serat, vitamin, dan antioksidan, sehingga memiliki prospek pasar yang luas baik untuk konsumsi domestik maupun ekspor (Hasriati & Anshar, 2023). Meskipun berasal dari daerah beriklim sedang, selada dapat dibudidayakan di wilayah tropis dengan manajemen lingkungan yang tepat. Secara agronomis, selada membutuhkan kondisi mikroklimat yang spesifik untuk pertumbuhan optimal; Murtianta et al. (2022) menyatakan bahwa suhu ideal berkisar antara 25–28°C dengan kelembaban udara 76–77% dan kelembaban tanah 80–100% (Murtianta et al., 2022), sedangkan Kusmutafmi et al. (2023) mencatat bahwa suhu di atas 31°C dapat menyebabkan stres fisiologis yang menghambat pertumbuhan, terutama pada varietas selada merah (Kusmutafmi et al., 2023). Oleh karena itu, kestabilan lingkungan menjadi faktor kritis yang sering kali sulit dicapai secara konvensional di lapangan.



Gambar 2. Tanaman Selada

Sumber: Murtianta et al. (2022)

Keberhasilan budidaya selada juga sangat bergantung pada pemilihan media dan manajemen nutrisi. Pada tahap pembibitan, Sudewi et al. (2022) menemukan bahwa media cocopeat memberikan viabilitas dan vigor terbaik (daya berkecambah 95,55% serta panjang akar 8,20 cm) dibandingkan media tanah atau arang sekam, terutama ketika dikombinasikan dengan nutrisi AB Mix sejak awal perkecambahan (Sudewi et al., 2022). Untuk tahap pertumbuhan. Mengingat sensitivitas selada terhadap fluktuasi lingkungan dan kebutuhan nutrisi yang presisi, integrasi teknologi seperti *Smart Greenhouse* berbasis IoT menjadi solusi strategis. Murtianta et al. (2022) menunjukkan bahwa sistem otomatis yang mengendalikan suhu, kelembaban, dan penyiraman mampu menghasilkan selada dengan jumlah daun lebih banyak dan akar lebih panjang dibandingkan metode konvensional, menegaskan bahwa pendekatan *precision* farming diperlukan untuk memaksimalkan produktivitas selada di kondisi iklim tropis (Murtianta et al., 2022).

1.6.3 Kebutuhan Agronomis Tanaman Selada

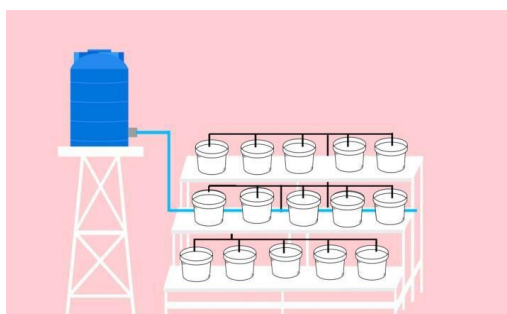
Tanaman selada (*Lactuca sativa* L.) memiliki kebutuhan agronomis yang khas, meliputi kestabilan kelembaban media, suhu lingkungan yang sesuai, intensitas cahaya yang cukup, serta keseimbangan unsur hara dalam zona perakaran. Selada tumbuh kondisi media yang lembab namun tidak jenuh karena kelebihan air dapat menurunkan aerasi akar dan menghambat respirasi, sementara kekurangan air menyebabkan penurunan tekanan turgor dan memperlambat pertumbuhan daun. Media tanam yang ideal memiliki struktur remah dengan drainase baik, seperti campuran cocopeat dan bahan mineral, sehingga mampu menjaga keseimbangan air dan udara serta mempertahankan pH yang optimal bagi penyerapan hara. Selain itu, selada memerlukan cahaya dengan intensitas sedang hingga tinggi untuk mendukung fotosintesis, namun paparan berlebih dapat memicu stres fisiologis dan mempercepat bolting yang menurunkan kualitas hasil. Dari sisi nutrisi, tanaman ini sangat responsif terhadap nitrogen sebagai pembentuk biomassa daun, serta membutuhkan fosfor dan kalium dalam jumlah seimbang untuk mendukung perkembangan akar dan ketahanan terhadap stres lingkungan (Resh, 2013; Taiz & Zeiger, 2015).

Dalam sistem budidaya skala pot, keterbatasan volume media menyebabkan dinamika air dan hara menjadi lebih sensitif dibandingkan budidaya lahan terbuka, sehingga kestabilan kondisi di zona perakaran menjadi faktor yang lebih menentukan dibandingkan besarnya input yang diberikan. Distribusi air yang tidak merata dapat menyebabkan heterogenitas pertumbuhan antar tanaman, sementara fluktuasi kelembaban yang tajam dapat memicu stres fisiologis meskipun total air yang diberikan mencukupi. Oleh karena itu, pendekatan pengelolaan agronomis yang menekankan distribusi input secara merata dan terkontrol menjadi penting untuk menjaga keseragaman pertumbuhan (Ahen et al., 2022; Shock et al., 2013).

Namun demikian, optimalisasi pertumbuhan selada tidak hanya ditentukan oleh pengelolaan faktor fisik dan kimia media, tetapi juga oleh kondisi biologis di dalamnya. Media tanam yang sehat dan bebas inokulum patogen menjadi kunci dalam mencegah gangguan pertumbuhan sejak fase awal. Keberhasilan budidaya selada pada sistem skala kecil berbasis pot merupakan hasil dari interaksi berbagai faktor agronomis yang saling terkait, di mana kestabilan kondisi akar dan efisiensi distribusi input menjadi elemen utama yang mendukung pertumbuhan optimal tanpa memerlukan intervensi yang berlebihan (Gordon & Koike, 2015; Latham et al., 2004).

1.6.4 Drip irrigation

Irigasi tetes (*drip irrigation*) merupakan metode pengairan modern yang menyalurkan air secara terkontrol dalam bentuk tetesan kecil langsung ke zona perakaran tanaman melalui jaringan pipa ber-*Emitter*, sehingga meminimalkan kehilangan air akibat evaporasi, limpasan, atau perkolasi berlebih. Menurut Ardiansah et al. (2018), efisiensi sistem ini mencapai 90–95%, menjadikannya solusi utama untuk pertanian berkelanjutan di lahan terbatas atau iklim kering (Ardiansah et al., 2018). Namun, sebagaimana dicatat Aji et al. (2025), keberhasilan teknis sistem irigasi tetes sangat bergantung pada stabilitas komponen pendukung, terutama *Emitter*, karena dapat menyebabkan ketidakmerataan distribusi air dan *over* irigasi apabila tidak diatur dengan benar (Aji et al., 2025). Rancangan sistem irigasi tetes diperlihatkan Pada Gambar 3.



Gambar 3. Sistem Irigasi Tetes

Sumber: Aji et al. (2025)

Dapat dilihat pada Gambar 3 dimana sistem irigasi tetes menggunakan 1 sumber air lalu dihubungkan dengan selang yang memiliki *Emitter* untuk mengairi tanaman. Temuan Azzani (2023) memperkuat hal metode ini seperti dalam penelitiannya yang berjudul sistem irigasi tetes berbasis IoT untuk selada merah, sensor kelembaban tanah membantu memberikan pembacaan konsisten, dan ketika diuji dalam skenario manual vs. otomatis tidak terdapat perbedaan signifikan pada kelembaban tanah mengindikasikan bahwa presisi distribusi air lebih dipengaruhi oleh kualitas fisik *Emitter* dan *layout* jaringan daripada sekadar otomatisasi kontrol (Azzani, 2023). Di sisi penerapan skala komunitas, Handani et al. (2024) mengungkapkan bahwa pemasangan instalasi *drip system* dengan pompa otomatis pada PT Tanduria Agromedia Indonesia, mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air sekaligus mengurangi ketergantungan pada tenaga kerja terutama saat gangguan distribusi air dari PDAM dengan hasil visual menunjukkan distribusi air yang merata ke setiap tanaman tomat dan mentimun di lahan $\pm 100 \text{ m}^2$ (Handani et al., 2024). Temuan ini menegaskan bahwa irigasi tetes bukan sekadar transfer teknologi, melainkan sistem yang memerlukan integrasi holistik desain teknis antara *layout* saluran air, pemilihan *Emitter*, tandon, material tahan korosi, pemantauan parameter tanah, serta adaptasi terhadap kondisi infrastruktur lokal (ketersediaan air, sumber listrik, kapasitas SDM petani).

1.6.5 Prinsip Tekanan dan Karakteristik *Emitter* pada Sistem Irigasi Tetes

Sistem irigasi tetes atau trickle irrigation merupakan metode pemberian air yang menyalurkan air secara perlahan dan terkontrol ke area sekitar perakaran tanaman melalui jaringan pipa dan emitter. Sistem ini termasuk dalam kelompok irigasi bertekanan, tetapi cara kerjanya berbeda dengan sprinkler karena air tidak disemprotkan ke udara. Air dialirkan dalam debit kecil melalui emitter sehingga pemberian air dapat lebih terarah pada zona yang dibutuhkan tanaman. Keller dan Bliesner (1990) menjelaskan bahwa sistem irigasi bertekanan, termasuk trickle irrigation, memiliki potensi efisiensi tinggi karena air dikeluarkan dekat dengan tanaman, yaitu pada area tempat air akan digunakan oleh tanaman. Dalam hidrolika jaringan distribusi, tekanan dapat dipahami melalui hubungan antara tekanan fluida dan tinggi kolom fluida. Hubungan tersebut dinyatakan melalui persamaan tekanan hidrostatik sebagai berikut (Munson et al., 2013):

$$P = \rho gh \quad (1)$$

di mana:

P adalah tekanan (Pa)

ρ adalah massa jenis fluida (kg/m^3)

g adalah percepatan gravitasi (m/s^2)

h adalah tinggi (m)

Persamaan (1) berlaku pada kondisi fluida statis sebagai titik referensi awal dan menunjukkan bahwa tekanan berbanding lurus dengan tinggi kolom fluida. Dalam sistem irigasi tetes, persamaan ini berguna sebagai dasar untuk memahami konsep pressure head. Semakin besar tinggi tekanan yang tersedia, semakin besar pula tekanan potensial yang dapat bekerja pada jaringan distribusi. Akan tetapi, persamaan ini tidak cukup digunakan sendiri untuk menjelaskan tekanan aktual pada emitter karena irigasi tetes bekerja dalam kondisi aliran dinamis, bukan dalam kondisi fluida statis. Pada sistem aliran dinamis, tekanan kerja aktual pada emitter dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor tersebut meliputi tekanan suplai, perbedaan elevasi lahan, kehilangan energi akibat gesekan sepanjang pipa lateral, serta kehilangan minor pada komponen jaringan seperti sambungan, fitting, katup, dan emitter. Keller dan Bliesner (1990) menjelaskan bahwa perhitungan tekanan dalam sistem irigasi perlu mempertimbangkan pressure head, elevation head, dan friction-loss head. Dengan demikian, tekanan efektif pada emitter merupakan tekanan yang tersisa setelah tekanan awal dikurangi berbagai kehilangan energi dalam jaringan.

Kehilangan energi pada lateral menjadi bagian penting dalam desain irigasi tetes karena aliran air mengalami penurunan tekanan sepanjang jalur distribusi. Valiantzas (2005) menjelaskan bahwa kehilangan gesekan pada lateral irigasi dapat dianalisis dengan pendekatan Darcy-Weisbach. Pendekatan ini relevan karena lateral irigasi memiliki aliran keluar secara bertahap melalui emitter, sehingga debit di sepanjang pipa tidak selalu seragam. Oleh karena itu, panjang lateral, diameter pipa, jumlah emitter, jarak antar-emitter, dan perbedaan elevasi perlu diperhitungkan agar tekanan kerja pada emitter tetap memadai. Debit air yang keluar dari emitter dipengaruhi oleh tinggi tekanan kerja pada emitter (Keller & Bliesner, 1990). Hubungan antara debit emitter dan tekanan kerja dapat dinyatakan melalui persamaan empiris berikut pada Persamaan (2) berikut.

$$q = K_d H^x \quad (2)$$

di mana:

q adalah debit *Emitter*,

H adalah tinggi tekanan kerja emitter

K_d adalah konstanta *Emitter*,

x adalah eksponen yang bergantung pada karakteristik *Emitter*

Nilai eksponen x menunjukkan tingkat kepekaan debit terhadap perubahan tekanan. Emitter dengan nilai x tinggi akan lebih sensitif terhadap perubahan tekanan, sehingga perubahan tekanan kecil dapat menyebabkan perubahan debit yang lebih besar. Sebaliknya, emitter dengan nilai x lebih rendah cenderung menghasilkan debit yang lebih stabil ketika terjadi variasi tekanan sepanjang lateral. Prinsip ini penting dalam desain irigasi tetes karena keseragaman distribusi air sangat dipengaruhi oleh kestabilan debit emitter. Berdasarkan hubungan tersebut, pemilihan emitter tidak dapat dilepaskan

dari kondisi hidrolika jaringan. Lahan dengan perbedaan elevasi, lateral yang panjang, atau jumlah emitter yang banyak memerlukan perhatian lebih terhadap variasi tekanan. Jika variasi tekanan terlalu besar, debit yang keluar dari emitter dapat menjadi tidak seragam. Akibatnya, sebagian tanaman menerima air lebih banyak, sedangkan tanaman lain menerima air lebih sedikit. Karena itu, desain irigasi tetes perlu memperhatikan tekanan suplai, kehilangan tekanan sepanjang pipa, karakteristik emitter, dan keseragaman distribusi air.

Selain aspek hidrolika, perencanaan irigasi tetes juga perlu disesuaikan dengan kebutuhan air tanaman. Allen et al. (1998) menjelaskan bahwa evapotranspirasi tanaman atau ET_c dapat dihitung melalui pendekatan koefisien tanaman, yaitu dengan mengalikan evapotranspirasi acuan ET_o dengan koefisien tanaman K_c . Nilai ET_o dipengaruhi oleh faktor iklim seperti radiasi matahari, suhu udara, kelembapan relatif, dan kecepatan angin. Sementara itu, nilai K_c dipengaruhi oleh jenis tanaman, karakteristik tajuk, dan fase pertumbuhan tanaman. Dengan demikian, kebutuhan air tanaman tidak bersifat tetap sepanjang periode pertumbuhan. Pada fase awal, fase perkembangan, fase pertengahan, dan fase akhir pertumbuhan, nilai K_c dapat berubah sehingga nilai ET_c juga berubah. Perubahan ini menjadi dasar dalam menyusun jadwal dan volume irigasi. Namun, volume air yang diberikan tidak hanya ditentukan oleh ET_c , tetapi juga perlu mempertimbangkan efisiensi aplikasi, keseragaman distribusi air, dan kondisi lapangan. Berdasarkan uraian tersebut, desain irigasi tetes perlu menghubungkan tiga aspek utama. Pertama, konsep tekanan dan pressure head dapat dijelaskan melalui Persamaan (1). Kedua, tekanan kerja aktual pada emitter harus memperhitungkan kehilangan energi akibat gesekan, kehilangan minor, dan perbedaan elevasi. Ketiga, debit emitter perlu dikaitkan dengan hubungan pada Persamaan (2) serta kebutuhan air tanaman berdasarkan ET_c . Ketiga aspek tersebut menentukan kemampuan sistem irigasi tetes dalam menyalurkan air secara efisien, seragam, dan sesuai dengan kebutuhan aktual tanaman.

1.6.6 Internet of Things (IoT)

IoT merepresentasikan sebuah revolusi teknologi yang menghubungkan berbagai benda di sekitar kita ke dalam jaringan internet secara berkesinambungan untuk mempermudah aktivitas sehari-hari. Menurut Susanto et al. (2022), IoT adalah sistem *embedded* yang bertujuan memperluas pemanfaatan konektivitas internet yang tersambung secara terus-menerus, memungkinkan berbagai objek seperti bahan pangan, elektronik, dan peralatan yang dilengkapi sensor untuk saling berbagi data dan dikendalikan jarak jauh. Teknologi ini mengintegrasikan berbagai komponen seperti sensor, *Radio Frequency Identification* (RFID), *Wireless Sensor Network*, dan *Smart Object* yang memungkinkan manusia berinteraksi dengan mudah terhadap semua peralatan yang terhubung jaringan internet (Susanto et al., 2022).



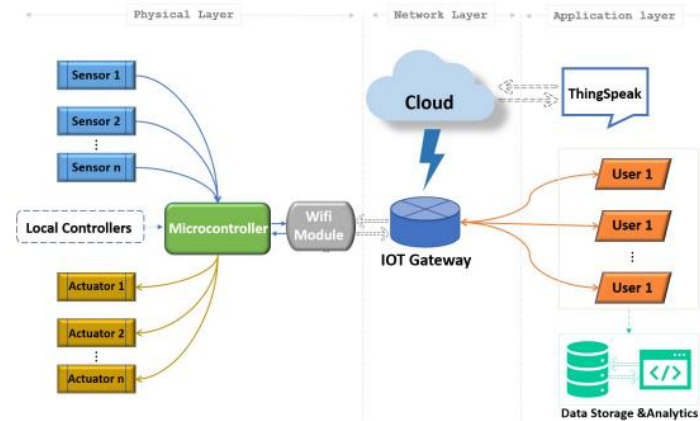
Gambar 4. *Internet of Things (IoT)*

Sumber: Susanto et al. (2022)

Dapat dilihat pada Gambar 4 Penerapan IoT mencakup berbagai aspek kehidupan seperti *smart home*, transportasi (kendaraan *self-driving*), kesehatan (monitoring pasien jarak jauh), *smart city*, dan utilitas publik, yang semuanya bertujuan untuk meningkatkan efisiensi, produktivitas, dan memudahkan aktivitas sehari-hari manusia melalui otomatisasi dan kendali jarak jauh. Sejalan dengan hal tersebut, Syahfitri (2025) menjelaskan bahwa IoT melibatkan penggunaan sensor dan perangkat lunak komunikasi untuk mengontrol, menghubungkan, dan mentransfer data antarperangkat dengan memanfaatkan jaringan internet. Konsep yang pertama kali diperkenalkan oleh Kevin Ashton pada tahun 1999 ini bekerja melalui alamat Protokol Internet (IP) unik yang memungkinkan setiap perangkat untuk saling berkomunikasi secara otomatis (Syahfitri, 2025).

1.6.7 Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)

Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) adalah protokol komunikasi berbasis publikasi/berlangganan (*publish-subscribe*) yang dirancang untuk lingkungan Machine-to-Machine (M2M) dan IoT. Protokol ini bersifat ringan, hemat energi, dan berjalan di atas TCP/IP, sehingga cocok digunakan pada perangkat dengan sumber daya terbatas seperti sensor atau mikrokontroler (Mishra et al., 2021). MQTT menggunakan tiga komponen utama: *publisher* (pengirim pesan), *subscriber* (penerima pesan), dan broker (server yang mengelola distribusi pesan). Pesan dikirim ke broker dengan menyertakan topik, lalu broker meneruskannya ke semua *subscriber* yang berlangganan pada topik tersebut.



Gambar 5. Protokol MQTT

Sumber: Niyigena Kwizera et al. (2021)

Salah satu keunggulan MQTT adalah dukungan terhadap tiga tingkat Quality of Service (QoS) yaitu QoS 0 (*at most once*), QoS 1 (*at least once*), dan QoS 2 (*exactly once*). Fitur ini memungkinkan pengembang menyesuaikan keandalan pengiriman pesan sesuai kebutuhan aplikasi, mulai dari skenario di mana kehilangan data tidak kritis hingga sistem yang memerlukan jaminan pengiriman tanpa duplikasi (OASIS, 2015). Selain itu, MQTT juga mendukung fitur retain message dan last will, yang membantu menjaga kontinuitas informasi bahkan ketika perangkat terputus secara tak terduga (Qays et al, 2023).

MQTT dinilai sangat cocok untuk sistem IoT karena efisiensinya dalam hal penggunaan *bandwidth*, konsumsi daya rendah, serta kemampuannya beroperasi di jaringan yang tidak stabil. Studi oleh Mishra et al. (2021) menunjukkan bahwa broker MQTT seperti Mosquitto unggul dalam lingkungan dengan sumber daya terbatas, sementara ActiveMQ lebih baik dalam skenario berskala besar berkat arsitektur multithread-nya (Mishra et al., 2021). Dengan kombinasi efisiensi, fleksibilitas QoS, dan potensi keamanan yang kuat, MQTT menjadi pilihan utama dalam berbagai aplikasi IoT modern, termasuk *smart grid* dan pertanian perkotaan.

1.6.8 Penelitian Terkait

Beberapa penelitian berikut merupakan sumber rujukan atau referensi yang digunakan dalam penelitian ini dengan pertimbangan relevansi dan *gap* penelitian yang memiliki keterkaitan dengan topik skripsi ini.

1. Kusumawardani et al. (2019) mengembangkan sistem irigasi tetes untuk tanaman jeruk yang dikendalikan menggunakan sensor kelembapan tanah. Sistem ini bekerja dengan memantau kondisi kelembapan tanah secara otomatis dan mengaktifkan penyiraman ketika nilai kelembapan berada di bawah batas yang telah ditentukan. Dengan pendekatan tersebut, sistem irigasi dapat mengatur distribusi air secara lebih efisien dan membantu menjaga kondisi tanah agar tetap optimal bagi pertumbuhan tanaman.

- Persamaan: Kedua penelitian sama-sama memanfaatkan sensor kelembapan tanah sebagai dasar pengambilan keputusan dalam sistem penyiraman otomatis berbasis irigasi tetes.
 - Perbedaan: Penelitian Kusumawardani et al. menggunakan sistem distribusi air dari tandon atau reservoir dengan jaringan pipa irigasi tetes konvensional, sedangkan penelitian ini menggunakan pompa air berdaya rendah 5V dan *adjustable water dripper* sehingga sistem lebih sederhana dan dapat diterapkan pada skala urban farming kecil atau UMKM.
2. Azzani (2023) merancang sistem irigasi tetes berbasis IoT untuk tanaman selada menggunakan mikrokontroler STM32 yang terhubung dengan NodeMCU ESP8266. Sistem ini dirancang untuk memantau kondisi lingkungan tanaman dengan mengukur suhu dan kelembapan tanah sehingga proses penyiraman dapat dilakukan secara lebih terkontrol. Integrasi mikrokontroler dengan jaringan IoT memungkinkan data kondisi tanaman dipantau secara jarak jauh serta mendukung pengelolaan irigasi yang lebih efisien.
 - Persamaan: Kedua penelitian sama-sama mengembangkan sistem irigasi tetes berbasis IoT untuk tanaman selada dengan memanfaatkan sensor lingkungan sebagai dasar pemantauan kondisi tanaman.
 - Perbedaan: Penelitian Azzani menggunakan arsitektur sistem dengan tandon air dan jaringan distribusi pipa irigasi tetes, sedangkan penelitian ini menggunakan pompa mini 5V dan *adjustable water dripper* yang lebih hemat energi dan lebih mudah diterapkan pada sistem urban farming skala kecil.
 3. Walidain (2024) mengembangkan sistem kendali kadar air tanah dan monitoring suhu tanah berbasis IoT pada sistem irigasi tetes. Sistem ini dirancang untuk memantau kondisi tanah secara berkelanjutan serta mengontrol proses penyiraman berdasarkan nilai kadar air tanah yang terdeteksi oleh sensor. Dengan adanya sistem monitoring berbasis IoT, pengelolaan air dalam sistem irigasi tetes dapat dilakukan secara lebih efisien serta membantu meningkatkan efektivitas perawatan tanaman.
 - Persamaan: Kedua penelitian sama-sama memanfaatkan teknologi IoT untuk memantau kondisi tanah dan mengontrol sistem irigasi tetes secara otomatis.
 - Perbedaan: Sistem pada penelitian Walidain masih menggunakan sumber air dari tangki atau tandon dengan distribusi pipa irigasi tetes, sedangkan penelitian ini menggunakan pompa air 5V dengan sistem *adjustable dripper* yang dirancang lebih sederhana dan hemat energi untuk penerapan pada urban farming.
 4. Fauzi dan Amarudin (2025) mengembangkan sistem monitoring dan kontrol irigasi tetes berbasis IoT dengan memanfaatkan mikrokontroler ESP32 sebagai pengendali utama. Sistem ini memungkinkan pengguna memantau kondisi sistem irigasi serta mengontrol proses penyiraman secara *real-time* melalui aplikasi berbasis web. Integrasi ESP32 dengan protokol komunikasi IoT memberikan kemudahan dalam pengelolaan sistem irigasi secara jarak jauh serta meningkatkan efisiensi penggunaan air dalam budidaya tanaman.

- Persamaan: Kedua penelitian sama-sama memanfaatkan mikrokontroler ESP32 dan teknologi IoT untuk mendukung sistem monitoring dan kontrol irigasi tetes secara *real-time*.
- Perbedaan: Fauzi dan Amarudin masih mengandalkan sistem distribusi air dari tangki dan lebih berfokus ke pengembangan website monitoring, sedangkan penelitian ini mengembangkan sistem pompa mini 5V dengan *adjustable water dripper* yang lebih ringkas, hemat energi, dan berpotensi lebih mudah diadopsi oleh pelaku urban farming skala rumah tangga maupun UMKM.

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dimulai dari bulan September 2025 dan berakhir pada bulan April 2026. Penelitian dilakukan di Laboratorium Telekomunikasi Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin dan rumah penulis, yang terletak di Jl. Opu Daeng Risadju, Asrama HUBDAM XVII, Kelurahan Tamparung keke, Kecamatan Mamajang, Kota Makassar.

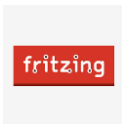
2.2 Analisis Kebutuhan

Perancangan dan implementasi infrastruktur urban farming untuk selada ini dapat direalisasikan dengan serangkaian kebutuhan perangkat keras dan perangkat lunak, dengan spesifikasi :

2.2.1 Kebutuhan Perangkat Lunak

Kebutuhan Perangkat Lunak merupakan uraian aplikasi dan program yang digunakan untuk memprogram logika, menguji kinerja logika dan visualisasi rangkaian secara *software* dalam penelitian ini, untuk kebutuhan penggunaan perangkat lunak dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Analisis perangkat lunak

Nama	Gambar	Fungsi
Thonny IDE		Digunakan untuk menulis, menguji, dan mengunggah kode MicroPython ke ESP32.
Fritzing		Digunakan untuk membuat diagram skematik rangkaian elektronik sebagai dokumentasi teknis dalam laporan
Wokwi		Platform simulasi berbasis browser untuk menguji logika kendali sensor, <i>relay</i> , dan komunikasi Wi-Fi sebelum perakitan fisik.
Visual Studio Code		Digunakan untuk environment pengujian komunikasi.
MQTT Broker		Digunakan sebagai server perantara komunikasi <i>publish-subscribe</i> antara ESP32 dan aplikasi Android melalui protokol MQTT. Broker ini menangani distribusi pesan sensor secara real time dan memastikan data dapat

Nama	Gambar	Fungsi
Android Studio		dikirim serta diterima dengan latensi rendah. Digunakan untuk mengembangkan aplikasi Android yang menampilkan data sensor (kelembapan, suhu, cahaya) secara real time, mengatur mode penyiraman (manual/otomatis) dan menerima notifikasi dari broker MQTT,.

Alur pengerjaan perangkat lunak dimulai dengan perancangan skematik rangkaian menggunakan Fritzing untuk memvalidasi koneksi antar komponen. Logika kendali pembacaan sensor, keputusan penyiraman, serta publikasi data dikembangkan di Thonny IDE dengan MicroPython, lalu diuji secara utuh dalam simulasi Wokwi, termasuk verifikasi koneksi ke MQTT broker dan pertukaran pesan pub-sub antara ESP32 virtual dan *subscriber* eksternal. Aplikasi Android dikembangkan di Android Studio untuk menampilkan data *real-time*, mengontrol pompa. Integrasi akhir dilakukan dengan menyambungkan ESP32 fisik dan aplikasi Android melalui protokol MQTT, sehingga terbentuk sistem IoT terpadu yang menggabungkan monitoring sensor, kontrol aktuator, komunikasi ringan berbasis dan pub-sub.

2.2.2 Kebutuhan Sistem

Kebutuhan Perangkat Keras merupakan uraian komponen elektronik dan mekanik fisik yang digunakan untuk membangun sistem secara utuh, mulai dari penginderaan, pengendalian, hingga aktuasi dengan tujuan mendefinisikan arsitektur fisik sistem yang dirancang dalam penelitian ini, dan untuk daftar lengkap kebutuhan perangkat keras dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Analisis perangkat keras

Nama	Spesifikasi	Fungsi	Jumlah
 ESP32	<i>Tegangan input: 5V Pin</i> <i>GPIO: 34</i> <i>ADC 12 bit: 18 saluran</i> <i>DAC 8 bit: 2 saluran Port</i> <i>USB: type C</i> <i>Size: 47*24mm</i>	Mikrokontroler utama yang membaca data sensor kelembaban tanah, mengontrol <i>relay</i> dan <i>water pump</i> , serta mengirim data ke server melalui Wi-Fi.	1
 Probe Soil moisture Sensor	<i>Tegangan kerja: 3,3–5V DC</i> <i>Jenis output: Analog</i> <i>Arus kerja: 5–30 mA</i> <i>Bahan Probe: PCB anti-korosi (kapasitif)</i> <i>Panjang sensor: ±98 mm</i>	Mendeteksi tingkat kelembaban tanah secara <i>real-time</i> untuk menentukan kebutuhan penyiraman.	1

Nama	Spesifikasi	Fungsi	Jumlah
Relay Module (1-channel) 	Tegangan kendali: 5V DC Arus kerja: 70–100 mA Tegangan beban maksimum: 250V AC / 30V DC Arus beban maksimum: 10A Size: 45 × 26 × 18 mm	Berfungsi sebagai saklar elektronik untuk mengontrol aliran listrik ke <i>water pump</i> berdasarkan sinyal dari ESP32.	1
DHT22 	Tegangan kerja: 3,3–6V DC Rentang suhu: –40°C hingga 80°C (±0,5°C) Rentang kelembapan: 0–100% RH (±2–5%) Frekuensi sampling: 0,5 Hz (1 data / 2 detik) Tipe output: Digital (single-wire)	Mengukur suhu dan kelembapan udara di sekitar tanaman untuk membantu pemantauan kondisi lingkungan tumbuh.	1
Water Pump Mini 	Tegangan kerja: 5V DC Arus kerja: 0,3–0,6 A Debit air: 120–240 L/jam Head maksimum: 1–1,5 meter Diameter pipa: 6 mm	Memompa air dari wadah ke media tanam selada saat sistem aktif.	1
LDR with module 	Tegangan kerja: 3,3–5V DC Resistansi terang: 5–10 kΩ Resistansi gelap: 0,5–1 MΩ Spektrum sensitif: 540 nm Output: ADC Diameter sensor: 5 mm <i>Pull-up Resistor</i>	Mendeteksi kondisi intensitas cahaya secara relatif (gelap/redup/terang) sebagai indikator siklus siang-malam dan kondisi cuaca.	1
Adaptor Power Supply 5V/2A 	Tegangan input: 220V AC Tegangan output: 5V DC (stabil) Arus maksimum: 2A Jenis konektor: DC <i>barrel</i>	Menyediakan sumber daya listrik stabil untuk ESP32, <i>relay</i> , dan <i>water pump</i> selama operasional.	1
Kabel Jumper 	Jenis kabel: <i>male–male</i> , <i>male–female</i> Panjang kabel: 10–20 cm	Digunakan untuk menghubungkan komponen.	1

Nama	Spesifikasi	Fungsi	Jumlah
 LCD OLED 0.97	Chipset SSD1306 Warna: putih Pin assignment VCC, GND, SCL, SDA Dimension: 27mm x 27mm x 4,1mm	Digunakan untuk menampilkan hasil pengukuran sensor secara langsung.	1
 Smartphone (Android)	OS minimum: Android 8.0 (Oreo) RAM: minimal 3 GB Koneksi: Wi-Fi 2.4 GHz Storage kosong: minimal 200 MB	Menjalankan aplikasi Android buatan sendiri untuk memantau data kelembaban, mengontrol mode penyiraman.	1

Kebutuhan Perangkat Keras mencakup seluruh komponen fisik yang membentuk sistem fungsional, dengan ESP32 sebagai pusat kendali yang terhubung langsung ke sensor *soil moisture*, DHT22, dan LDR untuk mengumpulkan data lingkungan dan aktuator berupa *water pump* mini dikendalikan oleh ESP32 untuk melakukan penyiraman otomatis. Sumber daya disediakan oleh adaptor *power 5V/2A*, sedangkan koneksi antar komponen menggunakan kabel jumper serta LCD OLED untuk menampilkan hasil pengukuran sensor secara langsung. Semua elemen dirancang untuk integrasi sederhana, hemat daya, dan operasional andal dalam sistem IoT monitoring. Pemantauan kelembaban tanah, suhu, kelembaban udara, dan intensitas cahaya menjadi krusial karena keempatnya secara langsung memengaruhi fisiologi tanaman untuk dapat memenuhi kondisi ideal pertumbuhan selada.

2.2.3 Kebutuhan Agronomis Sistem

Kebutuhan perangkat agronomi mencakup komponen fisik non-elektronik yang mendukung fungsi utama sistem irigasi otomatis, mulai dari wadah tanam, distribusi nutrisi, hingga media tumbuh, tujuannya adalah mendefinisikan arsitektur fisik eksternal sistem yang menjamin efektivitas penyampaian nutrisi, stabilitas pertumbuhan tanaman, dan skalabilitas desain. Untuk daftar lengkap kebutuhan perangkat mekanik dan agronomi dapat dilihat pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Kebutuhan agronomis sistem

Nama	Spesifikasi	Fungsi	Jumlah
 Pot Plastik Mini	Diameter: 10 cm Tinggi: 12 cm Material: HDPE food-grade Lubang drainase: 4 titik	Wadah tanam untuk selada skala urban, memastikan ruang akar memadai dan drainase optimal untuk mencegah genangan air.	18
 Water Dripper	Tipe: <i>Adjustable Spray</i> Diameter <i>in/outlet</i> : 6 mm Flow rate: 6-9 L/jam Working pressure: 150–400 kPa Material: Polipropilena	Titik keluaran nutrisi ke media tanam dan mengatur laju aliran secara pasif melalui hambatan internal.	18
 T Connector	Bentuk : T Lubang: 3 Ukuran: 7 mm	Connector dengan 3 ujing sebagai alat untuk menyambung selang.	7
 Selang	Diameter luar: 6 mm Diameter dalam: 4 mm Panjang antar dripper: 10 cm Panjang ke pompa: 25 cm	Saluran distribusi utama dan cabang.	7 m
 Media Tanam	Komposisi: • Cocopeat 20% • Hidroton 20% • Tanah 60%	Media tanam kombinasi tanah, cocopeat, dan hidroton yang menyeimbangkan ketersediaan hara dan mencegah genangan.	100g/pot

Pot plastik mini sebagai wadah tanam karena ukurannya sesuai untuk budidaya selada skala urban. *Dripper* dipilih sebagai titik keluaran, performanya dapat distabilkan melalui kalibrasi manual. Selang berdiameter 6 mm berfungsi sebagai saluran distribusi utama dan cabang, dipilih karena fleksibilitasnya, ketahanan terhadap tekuk, serta kemudahan dalam penyambungan ke T-connector dan *dripper*, dengan jarak antar titik penyiraman distandarkan sebesar 10 cm guna meminimalkan interferensi aliran dan memastikan distribusi spasial yang merata. Parameter kebutuhan ideal tersebut disajikan pada tabel 4 berikut. *Dripper* dioperasikan di bawah rentang tekanan

nominalnya (150–400 kPa) karena pompa yang digunakan memiliki head maksimum 1–1,5 m ($\pm 9,8$ –14,7 kPa), sehingga dripper berfungsi sebagai penyetaraan keluaran.

Tabel 4. Kebutuhan ideal selada

Kondisi	Parameter
pH Air	5 - 6,5
Kelembapan Tanah	65 – 78 % SM
Suhu Udara	25 – 28 °C
Kelembapan Udara	65 – 78 %
Sinar Matahari	8 – 12 Jam / Hari

Berdasarkan penelitian Ahen et al. (2022), kondisi ideal untuk budidaya selada dalam ruangan, memerlukan beberapa parameter yang harus dipenuhi. Dari semua parameter tersebut, dua faktor terbukti paling berpengaruh terhadap kesuburan adalah intensitas cahaya dan kelembaban tanah yang di mana ketidakseimbangan keduanya menyebabkan kematian massal pada perlakuan manual. Oleh karena itu, sistem ini menempatkan sensor sebagai komponen utama

2.2.4 Kebutuhan Protokol Komunikasi

Tabel 5. Kebutuhan protokol komunikasi

Parameter	Nilai / Deskripsi
1. Protokol Komunikasi	MQTT
2. Jaringan Akses	Wi-Fi 802.11 b/g/n (2.4 GHz)
3. MQTT Broker	Broker Publik
4. Subscribe data	urbanfarming/selada/...
5. QoS Level	QoS 0 dan QoS 1

Agar sistem dapat diimplementasikan di dunia nyata, komunikasi antara ESP32 dan aplikasi Android harus cepat, ringan, dan stabil. Penelitian ini menggunakan MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) sebagai protokol utama karena sifatnya yang ringan, hemat daya, dan mendukung komunikasi *publish-subscribe* yang cocok untuk perangkat IoT terbatas sumber daya (OASIS, 2015; Tusa & Clayman, 2021). ESP32 terhubung ke jaringan Wi-Fi 2,4 GHz lalu berkomunikasi dengan broker MQTT menggunakan topik terstruktur dan *payload* JSON.

Pemilihan Tabel 5 menunjukkan konfigurasi protokol: jaringan akses Wi-Fi 802.11 b/g/n, protokol MQTT, broker publik test.mosquitto.org, topik terstruktur untuk sensor dan aktuator, QoS 0 untuk data sensor (karena bersifat *stateless* dan nilai berikutnya menggantikan yang hilang), QoS 1 opsional untuk perintah aktuator jika diperlukan keandalan (OASIS, 2015).

2.3 Jenis dan Pendekatan Penelitian

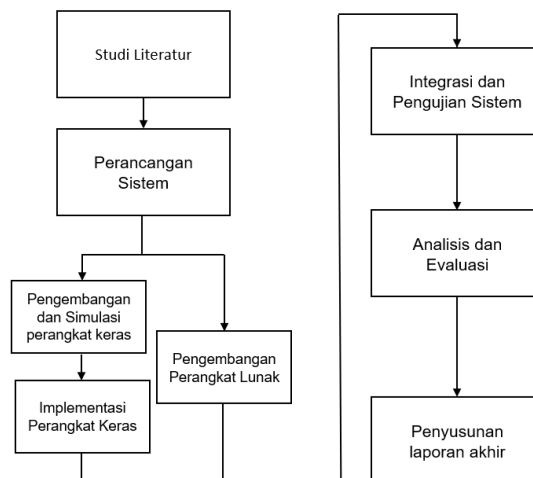
Penelitian ini menggunakan metode Research and Development (R&D) dengan pendekatan mixed-methods, yaitu memadukan analisis kualitatif dan kuantitatif dalam satu kerangka kerja yang saling melengkapi. Merujuk pada Waruwu (2024), R&D atau Penelitian dan Pengembangan merupakan metode yang berorientasi pada penciptaan dan pengujian produk. Dalam konteks ini, penelitian diawali dengan mengidentifikasi

masalah secara sistematis, kemudian merancang, mengembangkan, serta menguji sebuah produk yang diharapkan mampu menjadi solusi yang sah dan efektif terhadap persoalan tersebut.

Fokus utama R&D tercermin dalam rangkaian proses perancangan, implementasi, hingga pengujian. Pendekatan kualitatif dimanfaatkan untuk mengkaji data deskriptif fungsional, misalnya menilai apakah tiap komponen telah bekerja sesuai perannya serta mengamati bagaimana sistem merespons berbagai kondisi atau stimulus. Di sisi lain, pendekatan kuantitatif digunakan untuk mengolah data numerik yang terukur, seperti menghitung besaran *error* sensor. Perpaduan kedua pendekatan ini menghasilkan evaluasi yang lebih utuh, tidak hanya menunjukkan bahwa sistem dapat berjalan, tetapi juga menilai tingkat kualitas dan kinerja sistem tersebut secara terukur.

2.4 Tahapan Pelaksanaan Penelitian

Tahapan penelitian ini tersusun secara sistematis dan berurutan guna memastikan setiap langkah penelitian dilakukan sesuai dengan tujuan yang ditetapkan. Tahapan pelaksanaan penelitian ini dilihat pada Gambar 6 berikut.



Gambar 6. Kerangka Alur Penelitian

Gambar 6 menyajikan kerangka alur penelitian, mulai dari tahap studi *literatur* hingga proses penulisan laporan. Penjelasan rinci dari setiap bagian pada gambar ialah:

1. Studi *literatur*, dilakukan dengan menelaah landasan teori dan penelitian terdahulu sebagai dasar perumusan desain dan metodologi penelitian.
2. Perancangan sistem, mencakup perancangan arsitektur seluruh sistem unit baik perangkat keras, maupun unit perangkat lunak.
3. Pengembangan dan simulasi perangkat keras rangkaian, terdiri dari pengembangan sistem agronomis kebutuhan selada hingga merancang skematik rangkaian elektronik menggunakan Fritzing dan melakukan simulasi logika kendali secara virtual serta menggunakan Wokwi untuk validasi desain sebelum implementasi fisik.
4. Implementasi Perangkat Keras, merakit seluruh komponen perangkat keras sesuai dengan skema rangkaian yang telah divalidasi.

5. Pengembangan perangkat lunak: Membangun dan Mengembangkan aplikasi Android yang menampilkan Data *real-time* dan kontrol mode penyiraman.
6. Integrasi dan pengujian sistem, tahap ini melibatkan penyambungan seluruh sistem yang telah dirancang dan pengujian terhadap seluruh komponen yang telah diintegrasikan.
7. Analisis dan evaluasi, dilakukan dengan mengevaluasi kinerja sistem berdasarkan parameter fungsional yang telah ditentukan.
8. Penyusunan laporan akhir, mendokumentasikan seluruh proses, hasil, dan analisis penelitian ke dalam format laporan skripsi yang utuh.

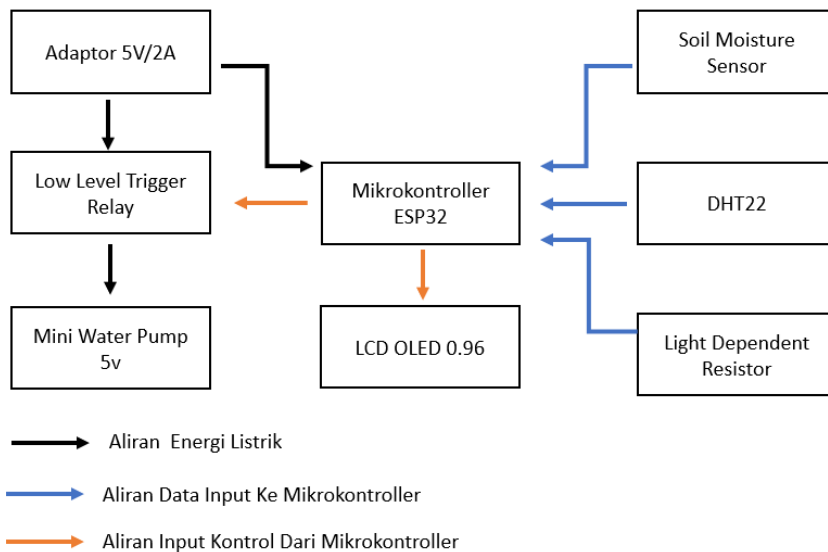
Bagan alur penelitian ini menggambarkan tahapan yang dilakukan secara sistematis untuk memastikan sistem dapat bekerja optimal dan sesuai dengan tujuan.

2.5 Perancangan Implementasi Sistem

Bagan alur penelitian ini menggambarkan tahapan sistematis yang dilakukan untuk membangun dan menguji sistem urban farming berbasis IoT. Tahapan ini dirancang untuk memastikan bahwa sistem dapat beroperasi secara optimal dan memenuhi tujuan penelitian, yaitu otomatisasi penyiraman dan monitoring parameter lingkungan tanaman selada. Sistem ini bertujuan untuk memberikan gambaran terhadap sistem yang akan dibuat dan dikembangkan, dengan informasi berikut.

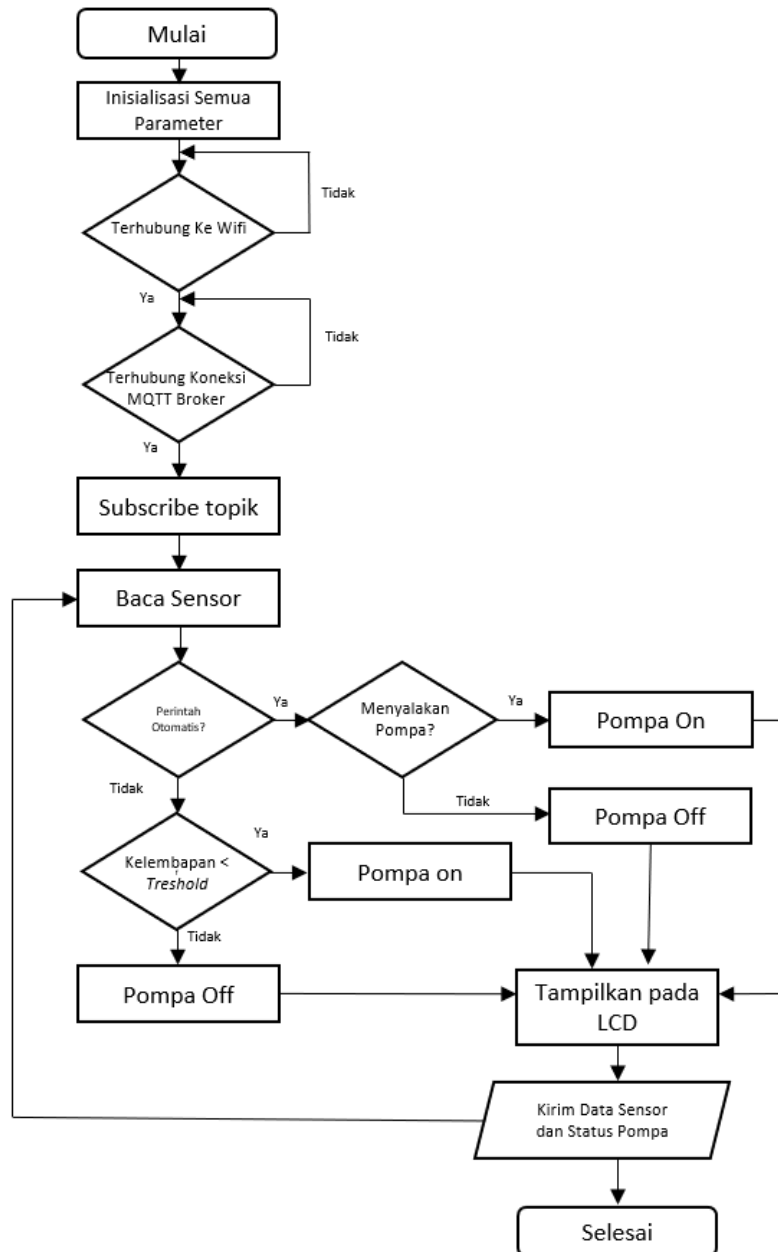
2.5.1 Perancangan Perangkat Keras

Sistem dirancang sebagai prototipe irigasi tetes berbasis IoT untuk skala urban farming rumah tangga, dengan fokus pada stabilitas operasional dan keandalan data sensor, bukan jumlah tanaman. Rancangan ini mengacu pada prinsip *drip irrigation* berbasis passive flow control (Aji et al., 2025), di mana distribusi air diatur melalui kombinasi hambatan hidrolik (selang infus 1 mm) dan kalibrasi manual (*adjustable dripper*) untuk mencapai target $1,0 \pm 0,1$ mL/penyiraman sesuai kebutuhan fisiologis selada *butterhead* (Ahen et al., 2022).



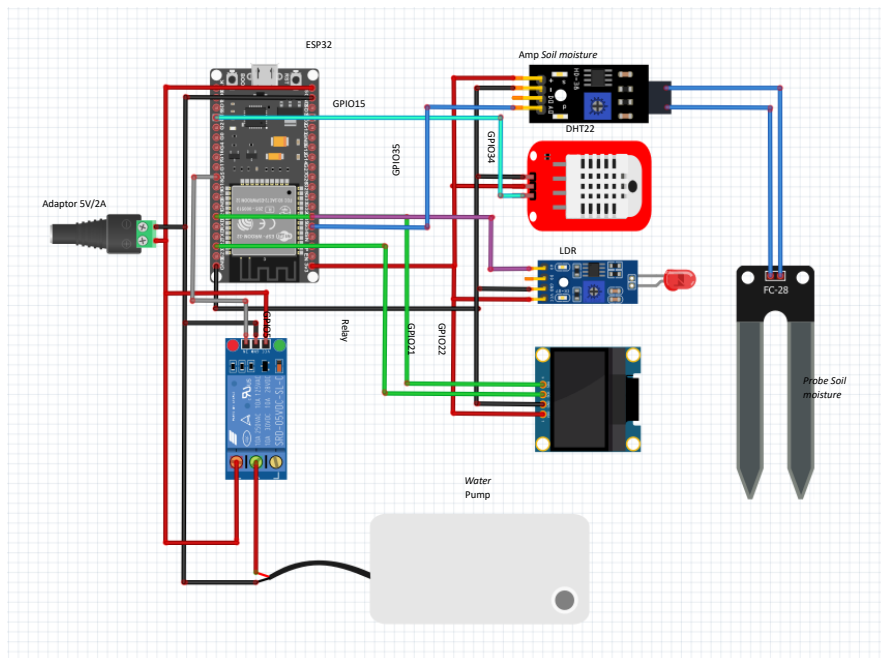
Gambar 7. Blok diagram sistem

Dari Gambar 7, terlihat bahwa sistem terdiri dari tiga aliran yaitu aliran energi listrik, aliran data input ke mikrokontroler dan aliran input kontrol dari mikrokontroler. Aliran daya listrik bertugas menyuplai energi ke seluruh komponen, mulai dari adaptor 5V/2A hingga aktuator pompa air. Sementara itu, aliran data input ke mikrokontroler memungkinkan sensor (*Soil moisture* Sensor, DHT22, *Light Dependent Resistor*) berinteraksi memberikan data ke mikrokontroler ESP32, yang hasil pengukuran sensor tersebut dikirimkan ke mikrokontroler lalu ditampilkan pada LCD untuk kemudian mengirimkan data ke aplikasi *smartphone* melalui koneksi Wi-Fi. Mikrokontroler juga bertindak sebagai pengendali aktuator (*Mini Water Pump*) melalui *relay*. Logika pemrograman dapat dilihat pada gambar 8 berikut.



Gambar 8. Logika pemrograman

Dapat dilihat pada Gambar 8 yang menggambarkan logika kontrol pompa berdasarkan mode operasi (manual atau otomatis) dan pengiriman data via MQTT broker. Pada mode manual, pompa dikendalikan langsung melalui perintah dari aplikasi smartphone. Sedangkan pada mode otomatis, pompa akan menyala jika nilai kelembaban tanah di bawah ambang batas tertentu. Perancangan perangkat keras di validasi menggunakan skematik pada *software* fritzing.



Gambar 9. Skematik pada Fritzing

Skematik koneksi *hardware* pada Gambar 9 menunjukkan cara menghubungkan semua komponen secara fisik. Amplifier *Soil moisture* terhubung ke GPIO34, sensor DHT22 ke GPIO15, sensor LDR ke GPIO35, *relay* ke GPIO5, sementara pada LCD OLED pin SDA terhubung pada GPIO21 dan SCL pada GPIO22. Semua komponen ditenagai oleh *power supply* 5V/2A, dengan *relay* yang bertugas mengaktifkan pompa air mini ketika diperlukan.

2.5.2 Perancangan Agronomis

Sistem IoT yang dikembangkan dirancang khusus untuk mendukung budidaya selada dalam skala urban farming. Sistem irigasi mengadopsi prinsip *adjustable flow compensation*, di mana *adjustable dripper* berfungsi sebagai regulator debit utama, sementara selang infus berdiameter 6 mm dengan panjang 7 m dipasang pada sisi hulu sebagai *pre-restriction flow limiter*.

2.5.2.1 Analisis Tekanan Sistem

Berdasarkan Persamaan (1), tekanan fluida dalam sistem dihitung menggunakan pendekatan tekanan hidrostatik dengan massa jenis air sebesar 1000 kg/m^3 dan percepatan gravitasi $9,81 \text{ m/s}^2$. Sementara untuk output *dripper*, berdasarkan spesifikasi *Water Pump Mini* 5V yang digunakan, *head* maksimum pompa adalah 1–1,5 meter. Untuk keperluan analisis, digunakan dua kondisi head, yaitu 0,4 m sebagai estimasi kondisi operasional normal dengan beban jaringan selang dan dripper, dan 1,0 m sebagai kondisi mendekati kapasitas maksimum pompa.

$$P = 1000 \times 9,81 \times 0,4 = 3924 \text{ Pa} = 3,924 \text{ kPa} \approx 0,039 \text{ bar}$$

Sementara pada output 1,0 m didapatkan:

$$P = 1000 \times 9,81 \times 1,0 = 9810Pa = 9,81kPa \approx 0,098 \text{ bar}$$

Persamaan (1) yang digunakan dalam perhitungan ini merupakan pendekatan tekanan hidrostatik ideal. Pada kondisi nyata, sistem irigasi bekerja secara dinamis sehingga tekanan fluida juga dipengaruhi oleh kehilangan energi (*head loss*) akibat gesekan sepanjang pipa, percabangan aliran, serta komponen sistem lainnya. Oleh karena itu, nilai tekanan yang diperoleh pada analisis ini merupakan estimasi teoritis atau batas atas (*upper bound*), sedangkan tekanan aktual dalam sistem kemungkinan lebih rendah dari nilai tersebut.

2.5.2.2 Analisis Debit Emitter

Debit air yang keluar dari emitter mengikuti hubungan pada Persamaan (2). Dalam penelitian ini, analisis dilakukan secara relatif dengan membandingkan perubahan debit terhadap perubahan tekanan tanpa menentukan konstanta emitter secara eksplisit. Karena tekanan P dan pressure head H berhubungan linear melalui Persamaan (1), rasio perbandingan tekanan setara dengan rasio perbandingan *pressure head*, sehingga Persamaan (2) dapat dinyatakan dalam bentuk rasio tekanan secara langsung. Dengan membandingkan dua kondisi tekanan terendah dan tertinggi, yaitu 0,039 bar dan 0,098 bar, diperoleh rasio tekanan sebesar:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{0,098}{0,039} = 2,5$$

Selanjutnya, perubahan debit dianalisis berdasarkan nilai eksponen karakteristik emitter. Pada kondisi aliran turbulen dengan nilai eksponen mendekati 0,5, diperoleh:

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{kP_2^x}{kP_1^x} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^x = (2,5)^{0,5} \approx 1,58$$

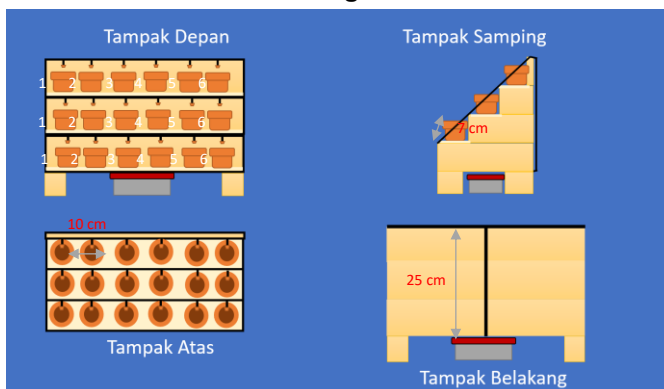
Hal ini menunjukkan bahwa kenaikan tekanan dari 0,098 bar menjadi 0,039 bar menyebabkan peningkatan debit sekitar 58%. Pada kondisi aliran laminar dengan nilai eksponen mendekati 1, diperoleh:

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{P_1}{P_2} = 2,5$$

yang menunjukkan bahwa debit meningkat hingga 2,5 kali lipat terhadap perubahan tekanan yang sama. Sementara itu, pada emitter tipe *pressure-compensating*, perubahan tekanan tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap debit, sehingga rasio debit mendekati satu. Hasil ini menunjukkan bahwa pada sistem bertekanan rendah, emitter *non-pressure-compensating* memiliki sensitivitas tinggi terhadap variasi

tekanan, sehingga perubahan kecil tekanan dapat menghasilkan perubahan debit yang cukup besar.

2.5.2.3 Implementasi Sistem dan Rancangan



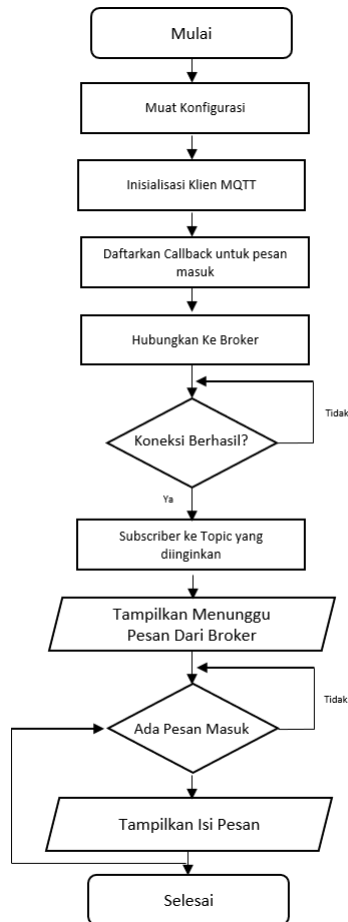
Gambar 10. Rancangan *Drip irrigation*

Dapat dilihat pada Gambar 10 merupakan ilustrasi perancangan, yang didesain untuk menyalurkan air secara terukur langsung ke zona perakaran tanaman dengan memanfaatkan komponen modular berupa selang dan *dripper*, serta menerapkan konsep *passive flow control* melalui hambatan hidrolik pada jaringan pipa. Dalam penelitian ini, desain sistem disederhanakan ke dalam skala mini yang sesuai untuk budidaya selada pada pot urban. Sistem hanya menggunakan satu pompa dan 18 titik tanam dengan media tanah.

Pendekatan ini tetap mempertahankan prinsip efisiensi penggunaan air dan presisi distribusi, namun lebih sesuai dengan keterbatasan ruang, biaya, dan kompleksitas sistem IoT skala individu. Ambang batas kelembaban tanah mengacu pada rekomendasi Ahen et al. (2022) untuk selada *butterhead* pada media cocopeat–zeolit, sementara pada kebutuhan air oleh Poga et al. (2023) pada fase awal 2,45 mm/hari, fase tengah 3,73 mm/hari, dan fase akhir 3,54 mm/hari. Namun, nilai tersebut disesuaikan kembali dengan kondisi lingkungan aktual tempat sistem diterapkan.

2.5.3 Perancangan Sambungan MQTT

Mikrokontroler ESP32 berperan sebagai *client* MQTT yang bertugas membaca data sensor, mengontrol aktuator (pompa air), serta mengirimkan data ke broker MQTT secara *real-time*. Proses kerja ESP32 dirancang secara *event-driven*., Diagram alur kerja sistem dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Diagram alur kerja protokol MQTT

Proses dimulai dengan inisialisasi konfigurasi Wi-Fi dan koneksi ke broker MQTT. Setelah koneksi berhasil, ESP32 akan melakukan *subscribe* ke topik tertentu untuk menerima perintah dari aplikasi Android. Selanjutnya, ESP32 akan membaca nilai sensor, lalu mengirimkan data tersebut ke broker MQTT melalui topik yang digunakan.

Pada mode otomatis, ESP32 akan mengaktifkan pompa air jika nilai kelembaban tanah di bawah ambang batas tertentu. Sedangkan apabila pengguna ingin melakukan kontrol secara manual, pompa dapat diaktifkan atau dinonaktifkan berdasarkan perintah yang diterima dari aplikasi Android melalui topik yang digunakan. Status pompa (ON/OFF) kemudian dikirimkan kembali ke broker melalui topik yang digunakan untuk ditampilkan di aplikasi Android. Pada penerapannya untuk sensor digunakan QoS 0 karena data akan dikirim secara konstan sementara pada aaktuator digunakan QoS 1.

Validasi protokol MQTT telah dilakukan selama proses perancangan, menggunakan aplikasi MQTTX. Hasil pengujian menunjukkan bahwa ESP32 mampu terhubung ke broker MQTT, melakukan *subscribe* dan *publish* dengan *latency* rata-rata <300 ms, serta respons terhadap perintah dari aplikasi Android berjalan secara *real-time* tanpa *delay* signifikan. Hal ini membuktikan bahwa protokol MQTT sangat cocok

digunakan dalam skenario IoT berbasis mikrokontroler dengan frekuensi sampling tinggi dan kebutuhan latensi rendah.

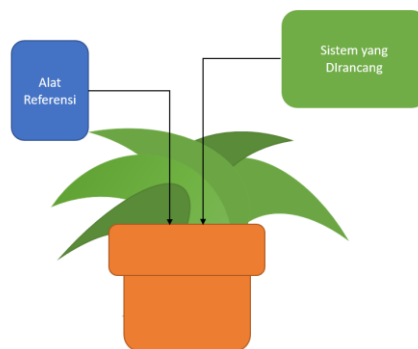
2.6 Skenario Pengujian

Tahap pengujian dalam penelitian ini bertujuan untuk melakukan verifikasi dan validasi terhadap setiap komponen dan sistem secara keseluruhan untuk memastikan fungsionalitasnya sesuai dengan perancangan. Proses ini mencakup pemeriksaan kinerja setiap komponen untuk memastikan kesesuaian dengan tujuan yang diinginkan. Skenario pengujian yang dilakukan adalah:

2.6.1 Skenario Pengujian Perangkat Keras

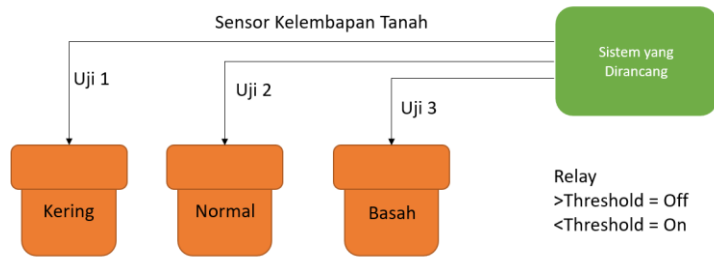
Fokus untuk memastikan perangkat keras dapat beroperasi secara optimal.

1. Uji Akurasi Sensor



Gambar 12. Ilustrasi Pengujian Akurasi Sensor

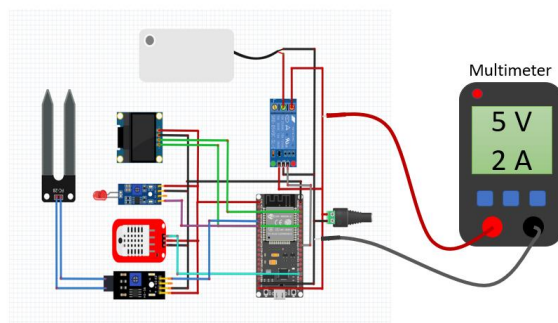
- Tujuan: memvalidasi akurasi pembacaan sensor tanah yang terhubung ke ESP32 dibandingkan alat ukur standar.
 - Alat dan bahan: *6 in 1 intelligent soil tester* (alat referensi) dan 1 pot tanaman selada sebagai objek uji.
 - Langkah-langkah:
 - a. Mengaktifkan sistem dan memastikan data sensor tampil pada OLED dan dikirim melalui topik urbanfarming/selada/sensor.
 - b. Menancapkan sensor dan alat ukur standar pada titik tanah yang sama. Penempatan sensor dilakukan pada titik yang paling representatif terhadap kondisi rata-rata media tanam, mempertimbangkan bahwa sistem menggunakan satu pompa tunggal yang mendistribusikan air secara seragam ke seluruh 18 pot.
 - c. Menunggu hingga pembacaan stabil.
 - d. Mencatat nilai kelembapan, suhu tanah, dan parameter lain dari kedua perangkat.
 - e. Pengukuran dilakukan berulang pada rentang waktu 09.00–18.00 WITA untuk mengamati konsistensi dan kemungkinan drift.
 - Indikator keberhasilan: deviasi antara sensor dan alat ukur standar $\leq 10\%$. Apabila ditemukan drift $> 10\%$, maka dilakukan kalibrasi ulang dan pengujian ulang secara eksperimental.
- #### 2. Uji aktuator otomatis



Gambar 13. Ilustrasi Pengujian Aktuator Otomatis

- Tujuan: memverifikasi bahwa logika kontrol otomatis pada ESP32 berjalan sesuai algoritma yang dirancang.
- Alat dan bahan: 3 kondisi tanah hasil perlakuan berbeda.
- Langkah-langkah:
 - a. Mengaktifkan sistem dalam mode otomatis.
 - b. Menancapkan sensor pada masing-masing kondisi tanah..
 - c. Mengamati :
 - Nilai sensor pada OLED
 - *Publish* data pada urbanfarming/selada/sensor
 - Status pompa pada urbanfarming/selada/pump/status
 - d. Mencatat apakah pompa aktif hanya saat nilai di bawah *threshold*.
- Indikator keberhasilan: Pompa aktif dan nonaktif sesuai logika kontrol yang telah dirancang.

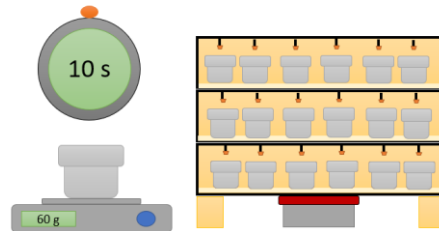
3. Uji *power supply* dan *wiring*



Gambar 14. Ilustrasi Pengujian *Power Supply* dan *Wiring*

- Tujuan: Memastikan sistem catu daya dan koneksi pin ESP32 sesuai dengan skematik perancangan.
- Alat dan Bahan: multimeter
- Langkah – Langkah:
 - a. Jalankan prototipe dan pastikan semua sensor terbaca pada layer LCD OLED.
 - b. Kalibrasi multimeter.
 - c. Mengukur pin VCC dan GND setiap komponen dan pastikan tidak alirannya sesuai dengan pin VCC dan GND ESP32.

- d. Prosedur ini diulangi pada seluruh jalur koneksi komponen yang terdapat pada prototipe.
 - Indikator keberhasilan: Tegangan stabil sesuai spesifikasi dan sistem beroperasi tanpa *restart* acak (*random reset*).
4. Uji kemampuan *water dripper*



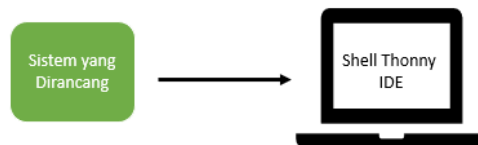
Gambar 15. Ilustrasi Pengujian Kemampuan *Water Dripper*

- Tujuan: memastikan sistem distribusi air bekerja secara merata dan sesuai target volume.
- Alat dan Bahan: 18 wadah dengan kapasitas yang sama, timbangan digital dan *stopwatch*
- Langkah-langkah:
 - a. Aktifkan Mengaktifkan pompa melalui mode manual dari aplikasi Android (*publish* ke *urbanfarming/selada/pump/control*).
 - b. Mengoperasikan pompa selama 10 detik.
 - c. Menampung air dari masing-masing *dripper*.
 - d. Menimbang dan massa air .
 - e. Menghitung rata-rata dan standar deviasi.
 - f. Pengujian dilakukan sebanyak 3x
- Indikator keberhasilan: Nilai *Coefficient of Uniformity* (CU) distribusi debit antar *dripper* mencapai $\geq 85\%$, sesuai standar *emission uniformity* minimum untuk sistem *point-source* 1 *emitter* per tanaman pada topografi seragam (Keller & Bliesner, 1990).

2.6.2 Skenario Pengujian Sistem Komunikasi

Memvalidasi fungsionalitas sensor dan logika automasi pompa.

1. Uji konektivitas ESP32 ke broker MQTT

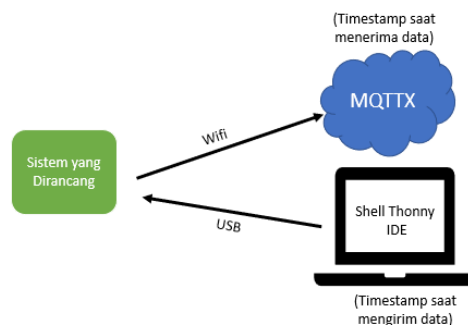


Gambar 16. Ilustrasi Pengujian Konektivitas ESP32 ke broker

- Tujuan: melihat waktu koneksi pertama kali (*connect time*) dan ketahanan koneksi saat Wi-Fi terputus dan pulih (*reconnect latency*).

- Langkah-langkah:
 - a. Sambungkan ESP32 ke broker public `test.mosquitto.org:1883`.
 - b. Pastikan ESP32 terbaca pada shell Thonny IDE.
 - c. Matikan dan jalankan ulang ESP32, lalu lihat pada tampilan waktu sejak Wi-Fi terdeteksi dan waktu ketika ESP32 connect dengan MQTT.
 - d. Prosedur ini diulangi sebanyak 10x, lalu diakhir dijumlahkan dan diambil nilai rata-ratanya.
- Indikator keberhasilan: waktu koneksi pertama kali ≤ 3 detik, dan *reconnect* setelah Wi-Fi pulih ≤ 5 detik (rata-rata dari 10 percobaan).

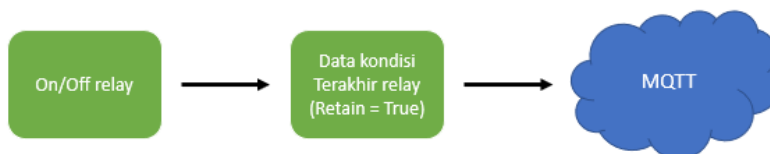
2. *Delay publish*



Gambar 17. Ilustrasi Pengujian *delay Publish*

- Tujuan: menguji *delay* antara pembacaan sensor, *publish* ke topik dan format *payload* JSON.
- Langkah-langkah:
 - a. Sambungkan ESP32 ke broker public `test.mosquitto.org:1883`.
 - b. Pastikan ESP32 terbaca pada shell Thonny IDE.
 - c. Sambungkan MQTTX dengan broker yang sama.
 - d. Subscribe ke topik ESP32.
 - e. Catat waktu pengiriman oleh ESP32 pada Shell Thonny IDE dan waktu penerimaan pada MQTTX.
 - f. Ambil selisih dari kedua nilai waktu tersebut.
 - g. Prosedur ini diulangi sebanyak 10x, lalu diakhir dijumlahkan dan diambil nilai.
- Indikator keberhasilan: *delay* rata-rata ≤ 400 ms.

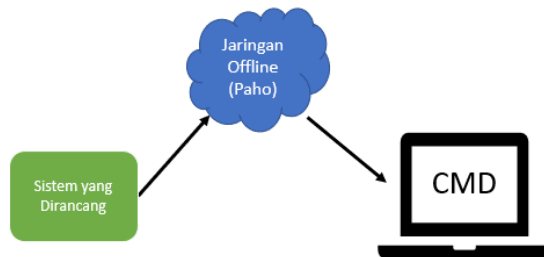
3. *Recovery setelah reboot*



Gambar 18. Ilustrasi Pengujian Recovery Setelah Reboot

- Tujuan: menguji apakah status pompa/mode terakhir tersimpan jika ESP32 *reboot*.

- Langkah-langkah:
 - a. Sambungkan ESP32 ke broker public *test.mosquitto.org:1883*.
 - b. Pastikan ESP32 terbaca pada shell Thonny IDE.
 - c. Sambungkan MQTTX dengan broker yang sama.
 - d. Subscribe ke topik ESP32.
 - e. Matikan dan jalankan ulang ESP32, lihat hasil retain pada MQTTX.
 - f. Prosedur ini diulangi sebanyak 10x, dan catat apakah sistem berhasil kembali ke kondisi sebelum mati.
 - Indikator keberhasilan: setelah *reboot*, ESP32 kembali ke mode & status pompa sebelum mati dalam ≤ 5 detik, tanpa reset ke *default*.
4. Kemampuan Wi-Fi lokal



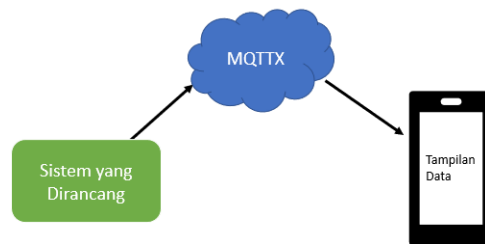
Gambar 19. Ilustrasi Pengujian Wi-Fi lokal

- Tujuan: memastikan perangkat tetap berjalan pada Wi-Fi lokal dan broker lokal.
- Langkah-langkah:
 - a. Buat broker lokal menggunakan Paho dan CMD di laptop.
 - b. Sambungkan ESP32 dan laptop ke jaringan yang sama.
 - c. Pastikan ESP32 terbaca pada shell Thonny IDE.
 - d. Lihat tampilan pengiriman data paho secara lokal
 - e. Subscribe ke topik ESP32.
 - f. Prosedur ini diulangi sebanyak selama 5 menit, untuk memastikan kemampuan sistem dalam bekerja secara lokal.
- Indikator keberhasilan: perangkat tetap berfungsi (kontrol & monitoring) tanpa internet, asal broker lokal aktif.

2.6.3 Skenario Pengujian Aplikasi *Android*

Memvalidasi komunikasi dan fungsionalitas antarmuka pengguna.

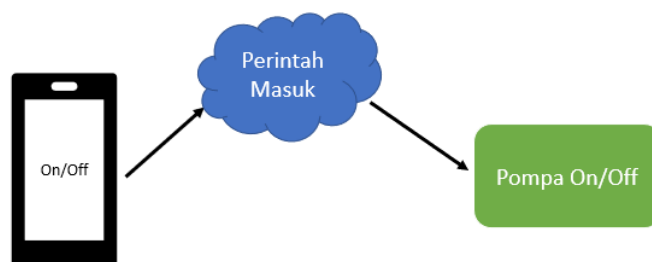
1. Uji tampilan data



Gambar 20. Ilustrasi Pengujian Tampilan Data

- Tujuan: memastikan terjadi *update* pada nilai sensor di aplikasi.
- Metode: memabandingkan kesesuaian data antara aplikasi dan MQTTX.
- Indikator keberhasilan: *update* data pada aplikasi sesuai dengan data masukan pada MQTTX.

2. Uji fungsi kontrol



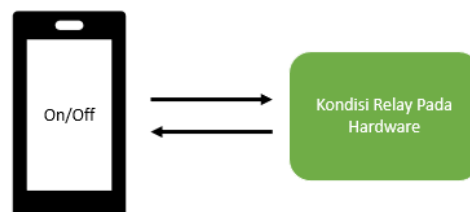
Gambar 21. Ilustrasi Pengujian Fungsi Kontrol

- Tujuan: menguji tombol kontrol pada aplikasi.
- Metode: menekan tombol pada aplikasi dan memastikan topik terkirim dan ESP32 merespons
- Indikator keberhasilan: 95% perintah menghasilkan respons (topik terkirim + pompa ON/OFF), dalam 10 percobaan.

2.6.4 Pengujian Sistem Integrasi

Pengujian ini bertujuan memastikan konsistensi antara sensor, keadaan fisik aktuator (pompa) di ESP32, komunikasi MQTT, dan tampilan status di aplikasi Android dalam pengujian lapangan.

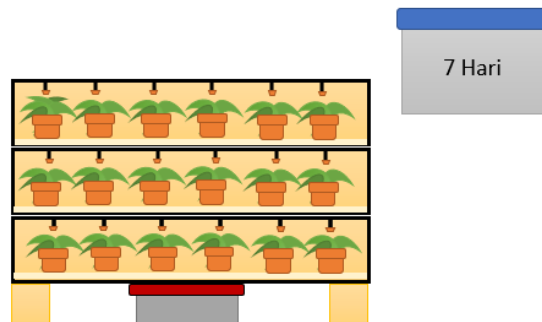
1. Pengujian konsistensi Sistem



Gambar 22. Ilustrasi Pengujian Konsistensi Sistem

- Tujuan: Memastikan tampilan antara aplikasi Android dan *hardware* sama.
- Metode: Atur mode “ON/OFF” via aplikasi, lalu memantau respons pompa fisik, publikasi ulang status oleh ESP32 (*urbanfarming/selada/pump/status*), dan pembaruan UI di Android termasuk saat berpindah halaman atau setelah reconnect. Lalu, *Reboot* ESP32 saat pompa aktif, lalu verifikasi: apakah aplikasi menerima *update* status terbaru tanpa *refresh* manual
- Indikator keberhasilan: Tidak ada *state mismatch* (misal: pompa nyala tapi UI tetap “OFF”).

2. Pengujian Stabilitas dan keandalan operasional



Gambar 23. Ilustrasi Pengujian Stabilitas dan Keandalan Sistem

- Tujuan: Memvalidasi kemampuan sistem beroperasi secara stabil selama periode pengamatan
- Metode: Sistem dijalankan selama 7 hari berturut-turut dengan pencatatan:
 - a. *Error* sistem
 - b. Gangguan koneksi
 - c. Kestabilan pembacaan sensor
 - d. Respons aktuator
- Indikator keberhasilan: Sistem beroperasi tanpa kegagalan selama periode pengujian.

2.7 Metode Analisis Data

Data yang telah diperoleh pada tahap pengujian akan diolah dan dianalisis menggunakan metode kualitatif dan kuantitatif. Tujuan dari analisis data adalah untuk menginterpretasikan hasil pengujian secara objektif guna menarik kesimpulan yang valid dan menjawab rumusan masalah penelitian.

2.7.1 Analisis Deskriptif Kualitatif

Metode Analisis deskriptif kualitatif digunakan untuk mengevaluasi aspek-aspek sistem yang bersifat fungsional dan observasional, yaitu data yang tidak dapat diukur secara numerik, melainkan dinyatakan dalam kategori seperti berfungsi/tidak berfungsi, tersambung/terputus, terdeteksi/tidak terdeteksi, atau stabil/tidak stabil. Metode ini diterapkan pada pengujian yang menghasilkan respons diskrit, misalnya keberhasilan koneksi ke broker MQTT, konsistensi mode operasi, atau keakuratan tampilan data sensor dan status aktuator pada antarmuka aplikasi.

Proses analisis dilakukan dengan membandingkan hasil observasi langsung terhadap indikator keberhasilan kualitatif yang telah didefinisikan pada setiap skenario pengujian. Hasil analisis dirumuskan dalam bentuk narasi deskriptif yang mencerminkan tingkat kesesuaian antara perilaku sistem aktual dan spesifikasi rancangan, sehingga dapat dijadikan dasar untuk menilai keandalan sistem dalam skenario penggunaan nyata.

2.7.2 Analisis Kuantitatif

Metode analisis kuantitatif digunakan untuk mengolah data numerik yang diperoleh dari pengukuran sensor dan alat ukur pembanding. Analisis ini melibatkan perhitungan matematis untuk mendapatkan nilai-nilai yang dapat mengukur kinerja sistem secara objektif. Persamaan-persamaan yang digunakan dalam analisis ini dapat dilihat sebagai berikut.

2.7.2.1 Latensi Komunikasi

Untuk menilai apakah sistem memenuhi kriteria *real-time*, latensi komunikasi dihitung sebagai selisih waktu antara saat perintah dikirim dari aplikasi (t_1) dan saat aktuator aktif pada sistem (t_2). dihitung dengan Persamaan (3) berikut.

$$Latensi = t_2 - t_1 \quad (3)$$

Di mana:

t_1 = waktu saat pengguna menekan tombol kendali pada aplikasi

t_2 = waktu saat aktuator (pompa) aktif pada *hardware*

Rumus ini diterapkan untuk menghitung latensi komunikasi yang terjadi pada saat sistem dijalankan. Ambang batas latensi sistem dianggap memenuhi kriteria *real-time* jika < 1 detik, sesuai rekomendasi untuk sistem kontrol irigasi berbasis IoT (OASIS, 2015).

2.7.2.2 Delivery success rate protocol MQTT

Delivery success rate dihitung sebagai persentase pesan yang berhasil diterima oleh ESP32 (bukan hanya sampai ke broker) dari total pesan yang dikirim dari aplikasi Android. Penghitungan dilakukan dengan mencatat jumlah pesan yang dipublikasikan (N dikirim) dan jumlah pesan yang benar-benar diproses oleh ESP32 (N diterima). Dihitung dengan Persamaan (4) berikut.

$$Success Rate MQTT = \frac{N \text{ diterima}}{N \text{ dikirim}} \times 100\% \quad (4)$$

Di mana:

$N \text{ diterima}$ = jumlah perintah yang berhasil diproses oleh ESP32

$N \text{ dikirim}$ = jumlah perintah yang dipublikasikan

Target *delivery success rate* $\geq 95\%$ dipilih sesuai karakteristik QoS 0 pada jaringan Wi-Fi lokal, di mana tingkat kehilangan paket $\leq 5\%$ masih dianggap dapat diterima untuk data sensor non-kritis (OASIS, 2015).

2.7.2.3 Analisis Error Sensor (% Error)

Validasi akurasi sensor dilakukan dengan persentase *error*, yang membandingkan hasil pembacaan sensor sistem dengan alat ukur standar yang digunakan dengan menggunakan Persamaan (5) berikut.

$$\text{Nilai Error (\%)} = \left| \frac{X_{\text{sistem}} - X_{\text{standar}}}{X_{\text{standar}}} \right| \times 100\% \quad (5)$$

Di mana:

X_{sistem} = nilai hasil pembacaan sensor sistem

X_{standar} = nilai hasil pengukuran alat ukur standar

Selanjutnya adalah persamaan perhitungan untuk mendapatkan nilai rata-rata *error* dari pengujian sensor itu sendiri dihitung dengan persamaan (6) berikut.

$$\text{Rata - rata Error (\%)} = \frac{\sum \text{Error}}{N} \quad (6)$$

Di mana:

N = Jumlah pengujian

Penerapan rumus ini menjadi sangat penting guna membuktikan keandalan pada sensor yang dirancang dengan alat ukur standar yang telah dikomersialkan.

2.7.2.4 Perhitungan Debit Air

Pengukuran debit air dilakukan menggunakan metode massa terhadap waktu, di mana air yang keluar dari *dripper* ditimbang menggunakan timbangan digital. Dengan asumsi densitas air sebesar 1 g/mL, maka massa air dapat dikonversi langsung menjadi volume.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (7)$$

Di mana:

Q = debit aliran (m³/s atau L/jam)

V = volume air (m³ atau L)

t = waktu (s atau jam)

Rumus ini digunakan untuk menentukan debit air yang dihasilkan oleh setiap *dripper* berdasarkan hasil pengukuran eksperimen.

2.7.2.5 Analisis Distribusi Air

Untuk mengevaluasi distribusi aliran air pada beberapa titik *dripper*, digunakan nilai rata-rata debit sebagai acuan perbandingan.

$$Q_{\text{avg}} = \frac{\sum Q_i}{N} \quad (8)$$

Di mana:

Q_{avg} = debit rata-rata (L/jam)

Q_i = debit pada titik ke- i

n = jumlah titik pengukuran

Selanjutnya, perbedaan debit pada masing-masing titik dihitung dalam bentuk persentase terhadap nilai rata-rata sebagai berikut:

$$Error (\%) = \left| \frac{Q_i - Q_{avg}}{Q_{avg}} \right| \times 100\% \quad (9)$$

Pendekatan ini digunakan untuk menilai variasi distribusi aliran dalam sistem. Nilai persentase yang kecil menunjukkan bahwa perbedaan debit antar titik relatif rendah dan masih dalam batas toleransi sistem irigasi tetes skala kecil.

2.7.2.6 Penggunaan Listrik

Analisis kinerja energi sistem pada penerapannya didasarkan pada perhitungan energi listrik dalam satuan *Watt-hour* (Wh). Perhitungan ini menggunakan rumus fundamental yang menghubungkan daya listrik dengan durasi waktu operasionalnya, seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (10) berikut.

$$E = P \times t \quad (10)$$

Di mana:

E adalah Energi Listrik (Wh)

P adalah Daya Listrik (W)

t adalah Durasi Waktu (h)

Rumus ini diterapkan untuk menghitung total energi harian yang diproduksi oleh panel surya dan total energi yang dikonsumsi oleh seluruh komponen sistem.

2.7.2.7 Persentase Penghematan

Perhitungan tingkat efisiensi penggunaan air dilakukan menggunakan rumus persentase penurunan (*percentage decrease*), yaitu dengan membandingkan selisih konsumsi air sistem manual dan sistem otomatis terhadap konsumsi sistem manual sebagai nilai acuan. Dihitung dengan Persamaan (11) berikut.

$$Persentase \text{ Penghematan} = \frac{Nilai \text{ Awal} - Nilai \text{ Akhir}}{Nilai \text{ Awal}} \times 100\% \quad (11)$$

Rumus ini diterapkan untuk menghitung hasil penghematan air yang telah dilakukan oleh sistem.

2.7.2.8 Coefficient of Uniformity

Coefficient of Uniformity (CU) merupakan parameter yang digunakan untuk mengevaluasi tingkat keseragaman distribusi air pada sistem irigasi, nilai CU menunjukkan seberapa merata air yang didistribusikan oleh setiap *emitter* ke area tanaman. Semakin tinggi nilai CU, maka distribusi air semakin merata, sedangkan nilai CU yang rendah menunjukkan adanya ketidakseimbangan distribusi air antar titik irigasi, dihitung dengan Persamaan 12.

$$CU (\%) = 100 \times \left(1 - \frac{\sum |z - m|}{\sum z} \right) \quad (12)$$

Di mana:

CU adalah *Coefficient of Uniformity*

z adalah debit/volume air pada titik pengamatan

m adalah air rata-rata dari seluruh titik pengamatan

$\sum |z - m|$ adalah jumlah deviasi absolut terhadap nilai rata-rata

$\sum z$ adalah total volume air seluruh titik pengamatan

Perhitungan CU dalam penelitian ini dilakukan dengan membandingkan volume air yang diterima pada setiap titik terhadap nilai rata-ratanya. Dengan demikian, CU dapat digunakan sebagai indikator kinerja sistem irigasi dalam mendistribusikan air secara efisien dan merata (Keller & Bliesner, 1990).

