

IMPLEMENTASI IOT UNTUK PEMANTAUAN DAN SISTEM REKOMENDASI PEMBERIAN KADAR CO₂ PADA TANAMAN ANGGUR MENGGUNAKAN WSN

Aditya Ramadhan Surya Saputra¹, Khodijah Amiroh², Philip Tobianto Daely³

^{1,2,3}Fakultas Informatika, Universitas Telkom, Surabaya

¹adityaramadhansurya@student.telkomuniversity.ac.id, ²dijaamirah@telkomuniversity.ac.id,

³philipdaely@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Dalam budidaya tanaman anggur di greenhouse, permasalahan utama yang muncul biasanya adalah kurangnya efisiensi dalam pengukuran kadar CO₂ secara manual. Hal ini dapat menghambat pengelola dalam mengoptimalkan lingkungan tumbuh yang ideal untuk tanaman anggur, yang membutuhkan kadar CO₂ berkisar 400-600 ppm. Pentingnya topik ini terletak pada potensi peningkatan efisiensi dan produktivitas dalam sektor pertanian, terutama dalam budidaya tanaman bernilai tinggi seperti anggur. Solusi yang diusulkan adalah penerapan teknologi Internet of Things (IoT) dengan menggunakan fuzzy logic untuk mengelola data sensor CO₂ dalam greenhouse. Melalui jaringan sensor nirkabel (WSN), data CO₂ akan dikirimkan secara berkala ke server, yang selanjutnya diolah untuk memberikan rekomendasi langsung mengenai kadar CO₂ yang optimal. Platform web akan memfasilitasi pengelola untuk memantau kondisi lingkungan dan mengambil tindakan yang diperlukan secara real-time. Hasil utama yang diharapkan dari penelitian ini adalah peningkatan kualitas tanaman anggur serta efisiensi operasional dalam budidaya, dengan menghasilkan bukti empiris mengenai hubungan antara kadar CO₂ dan kualitas hasil panen anggur di greenhouse IT Telkom Surabaya.

Kata kunci : CO₂, Fuzzy, Greenhouse, IoT, WSN

Abstract

In the cultivation of grapevines in greenhouses, a primary issue typically arises from the inefficiency of manually measuring CO₂ levels. This can hinder managers in optimizing the ideal growing environment for grapevines, which require CO₂ levels ranging from 400-600 ppm. The significance of this topic lies in its potential to enhance efficiency and productivity in the agricultural sector, particularly in cultivating high-value crops like grapes. The proposed solution involves implementing Internet of Things (IoT) technology using fuzzy logic to manage CO₂ sensor data within the greenhouse. Through a wireless sensor network (WSN), CO₂ data is periodically transmitted to a server, which processes it to provide real-time recommendations on optimal CO₂ levels. A web platform will facilitate managers in monitoring environmental conditions and taking necessary actions promptly. The primary expected outcomes of this research include improving grapevine quality and operational efficiency in cultivation, supported by empirical evidence on the relationship between CO₂ levels and grape harvest quality in the IT Telkom Surabaya greenhouse.

Keywords: CO₂, Fuzzy, Greenhouse, IoT, WSN

1. Pendahuluan

Latar Belakang

Dalam budidaya tanaman anggur di greenhouse, tantangan utama yang dihadapi adalah pengelolaan kadar CO₂ yang masih mengandalkan metode manual, yang sering kali terbatas dalam hal efisiensi dan akurasi. Metode pengukuran manual ini tidak mampu memberikan data yang real-time, sehingga mengurangi kemampuan untuk memantau dan mengatur kadar CO₂ dengan tepat [1]. Keterbatasan ini berdampak negatif pada kualitas dan produktivitas tanaman anggur, serta pada efisiensi operasional secara keseluruhan. Masalah ini mencerminkan kekurangan dalam penelitian yang mendalam mengenai kadar CO₂, yang belum sepenuhnya terfokus pada aspek ini, sehingga memerlukan solusi inovatif yang dapat memberikan dampak positif bagi sistem budidaya tanaman anggur.

Kadar CO₂ memiliki peran yang penting dalam proses fotosintesis, yang memungkinkan tanaman mengubah energi matahari menjadi zat organik yang esensial untuk pertumbuhan dan metabolisme [2]. Peningkatan kadar CO₂ dapat merangsang proses fotosintesis dan meningkatkan kemampuan tanaman untuk menggunakan energi matahari dengan lebih efisien [3]. Walaupun CO₂ merupakan isu global, terutama di kota-kota besar yang mengalami polusi udara tinggi, CO₂ tetap merupakan elemen vital dalam pertanian [4].

Di area perkotaan yang padat, penambahan CO₂ menjadi sangat penting untuk membantu tanaman mengatasi kondisi lingkungan yang seringkali terbatas, seperti polusi udara dan efek panas perkotaan [5]. Penambahan CO₂ dalam hal ini tidak hanya membantu tanaman bertahan dalam lingkungan yang kurang ideal tetapi juga mendukung ketahanan pangan lokal dengan meningkatkan produktivitas tanaman di ruang terbatas [6].

Selain itu, dalam greenhouse, pemantauan dan pengaturan kadar CO₂ sangat penting untuk menciptakan kondisi yang optimal bagi fotosintesis [7]. Dengan kadar CO₂ yang tepat, tanaman dapat melakukan fotosintesis secara lebih efektif, yang pada gilirannya meningkatkan hasil panen dan memaksimalkan efisiensi penggunaan sumber daya [8]. Pengendalian kadar CO₂ di greenhouse tidak hanya mendukung pertumbuhan tanaman yang sehat tetapi juga meningkatkan efisiensi operasional dan keberlanjutan pertanian di lingkungan yang terkontrol [9].

Sebagai solusi terhadap tantangan ini, penelitian ini mengusulkan integrasi IoT dan fuzzy logic untuk otomatisasi pemantauan dan pengelolaan kadar CO₂. Dengan memanfaatkan sensor dalam Wireless Sensor Network (WSN), sistem ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi, akurasi, dan kualitas pengelolaan kadar CO₂ pada tanaman anggur. Teknologi ini memungkinkan pemantauan kondisi lingkungan secara real-time dan memberikan informasi serta rekomendasi yang tepat waktu untuk tindakan yang diperlukan [10].

Keunggulan solusi ini tidak hanya terletak pada peningkatan produktivitas tanaman anggur tetapi juga pada kemampuannya memberikan alternatif efektif untuk mengatasi berbagai tantangan di bidang pertanian. Integrasi teknologi sensor dan komputasi membuka peluang untuk penelitian lebih lanjut dan pengembangan pertanian berbasis teknologi yang lebih cerdas dan terhubung. Dengan mengadopsi pendekatan ini, diharapkan dapat memperbaiki manajemen pertanian secara keseluruhan, mendukung produktivitas yang lebih tinggi dan keberlanjutan lingkungan, serta memberikan dasar yang kuat untuk inovasi dan pengembangan lebih lanjut dalam pengelolaan pertanian modern.

Topik dan Batasannya

Dalam penelitian ini, fokusnya adalah pada pengembangan sistem monitoring dan pengelolaan kadar CO₂ secara real-time untuk tanaman anggur di greenhouse. Permasalahan utama yang diangkat adalah metode pengukuran kadar CO₂ yang masih dilakukan secara manual, sehingga tidak memungkinkan pengukuran real-time dan akses jarak jauh. Ketidaktepatan dalam pengelolaan kadar CO₂ yang diakibatkan oleh keterbatasan ini dapat berdampak negatif pada produktivitas dan kualitas buah anggur. Penelitian ini dibatasi pada pengembangan sistem yang mampu melakukan monitoring otomatis, memberikan rekomendasi untuk pengelolaan CO₂ yang optimal, serta memungkinkan akses dan kontrol dari jarak jauh.

Batasan dalam penelitian ini meliputi beberapa aspek, yaitu lingkup penelitian yang hanya berfokus pada Greenhouse IT Telkom Surabaya, objek penelitian yang terbatas pada tanaman anggur, serta penelitian yang berfokus pada pengukuran dan rekomendasi pemberian kadar CO₂.

Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan sebuah sistem yang mampu mengukur dan memantau kadar CO₂ secara real-time pada tanaman anggur di greenhouse, serta memberikan rekomendasi otomatis untuk pengelolaan kadar CO₂ yang optimal. Dengan sistem ini, diharapkan permasalahan terkait ketidaktepatan pengelolaan CO₂ akibat metode pengukuran manual dapat diatasi, sehingga tanaman anggur dapat tumbuh dalam kondisi yang lebih ideal, yang pada akhirnya meningkatkan kualitas dan kuantitas hasil panen. Sistem ini juga akan dirancang untuk memungkinkan akses dan kontrol dari jarak jauh, memberikan fleksibilitas dan kemudahan bagi petani dalam mengelola kadar CO₂ di greenhouse mereka.

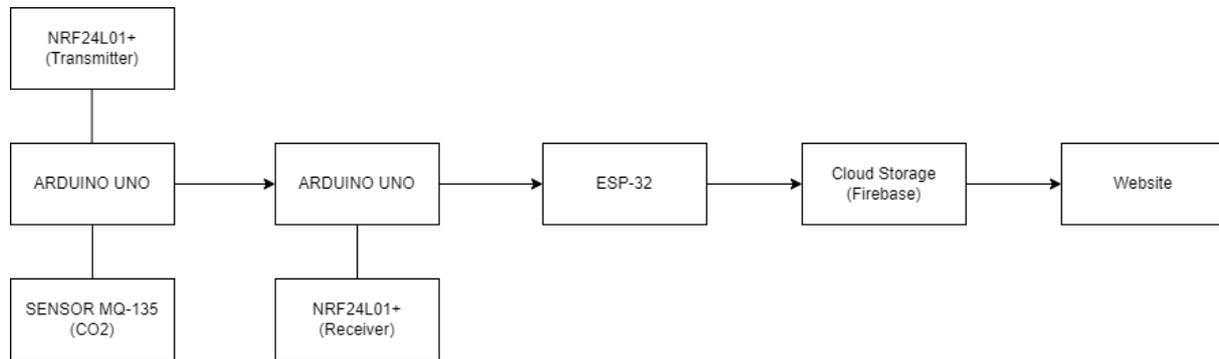
2. Studi Terkait

Berikut adalah beberapa penelitian terkait yang dijadikan referensi pada penelitian ini. Penelitian pertama membahas desain sistem pendeteksi serapan CO₂ pada tumbuhan dengan menggunakan sensor MH-Z19 dan Arduino Uno untuk pengukuran, menemukan bahwa penyerapan CO₂ terbaik terjadi pada hari-hari cerah [11]. Penelitian kedua mengimplementasikan sistem IoT untuk pemantauan iklim mikro rumah kaca dengan Raspberry Pi dan sensor SHT11 serta GUVVA-S12SD untuk mengatur sistem pendinginan berbasis kabut [12]. Penelitian ketiga memfokuskan pada pengembangan sistem rekomendasi lahan pertanian berbasis konten di Kabupaten Sleman dengan metode content-based filtering [13]. Penelitian keempat menciptakan platform pintar berbasis IoT dan WSN untuk monitoring dan kontrol rumah kaca, menggunakan fuzzy logic untuk pengambilan keputusan otomatis terkait iklim dan irigasi [14]. Penelitian kelima merancang jaringan sensor nirkabel untuk pengendali rumah kaca pintar, mengintegrasikan teknologi RF terbuka dan mengembangkan protokol komunikasi untuk kontrol suhu dan kelembaban [15].

Penelitian-penelitian tersebut memberikan pengetahuan yang baru dan beragam mengenai implementasi teknologi dalam bidang pertanian dan penggunaan sensor untuk meningkatkan efisiensi dan hasil pertanian. Setiap penelitian memiliki pendekatan dan aplikasi teknologi yang berbeda, menunjukkan kemajuan dalam bidang IoT, pengelolaan sumber daya pertanian, dan penggunaan teknologi sensor dalam meningkatkan kualitas lingkungan tumbuh tanaman.

3. Sistem yang Dibangun

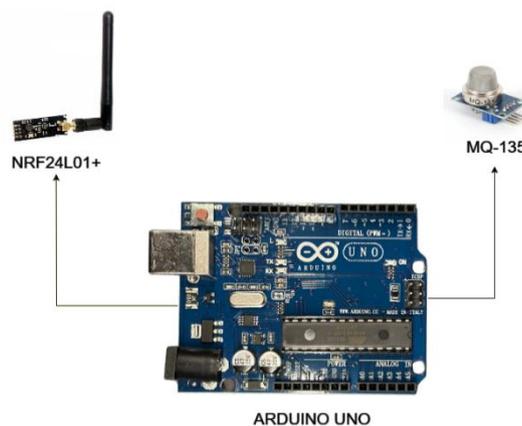
Diagram Blok



Gambar 1. Diagram Blok

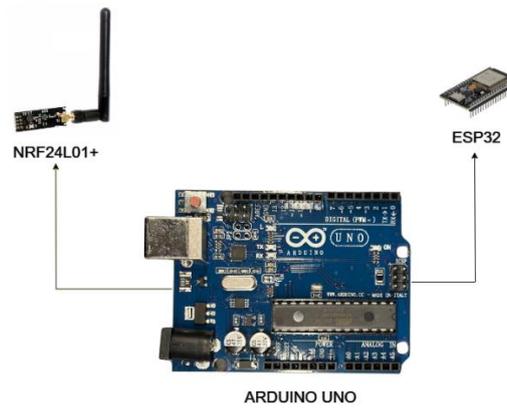
Dari gambar 2 bisa dilihat jika sensor MQ-135 yang digunakan untuk mengukur kadar CO₂ terkoneksi dengan modul NRF24L01+ (Transmitter) yang terhubung ke Arduino Uno. Data dari sensor ini kemudian dikirim secara nirkabel melalui NRF24L01+ (Transmitter) ke NRF24L01+ (Receiver) yang juga terhubung ke Arduino Uno lainnya. Arduino Uno (Receiver) ini kemudian meneruskan data ke ESP-32, yang menggunakan koneksi WiFi untuk mengirim data tersebut ke Firebase. Firebase berfungsi sebagai platform untuk menyimpan data yang diterima dari ESP-32. Data yang tersimpan di Firebase kemudian dapat diakses dan ditampilkan melalui sebuah website untuk pemantauan dan analisis lebih lanjut.

Rancangan Alat



Gambar 2. Rancangan Alat Transmitter

Gambar rancangan di atas menunjukkan transmitter yang terdiri dari Arduino Uno, sensor MQ-135, dan modul komunikasi NRF24L01+. Arduino Uno berfungsi sebagai pusat pengendali yang membaca data dari sensor MQ-135, yang mendeteksi kadar CO₂ di udara. Data ini kemudian dikirimkan secara nirkabel menggunakan modul NRF24L01+ ke receiver. Sistem ini memungkinkan pemantauan kadar CO₂ secara real-time, membantu menjaga kondisi optimal bagi pertumbuhan tanaman anggur.



Gambar 3. Rancangan Alat Receiver

Gambar rancangan di atas menunjukkan sistem receiver yang terdiri dari Arduino Uno, ESP32, dan modul komunikasi NRF24L01+. Arduino Uno berfungsi sebagai pengontrol utama yang menerima data nirkabel dari modul NRF24L01+, yang sebelumnya dikirim oleh transmitter. ESP32 terhubung dengan Arduino Uno, memberikan kapasitas tambahan untuk pemrosesan data atau komunikasi lebih lanjut, seperti pengiriman data ke firebase atau antarmuka pengguna. Sistem ini memungkinkan penerimaan dan pengolahan data CO₂ secara efisien, serta mendukung integrasi dengan berbagai platform untuk pemantauan dan analisis lebih lanjut.

Kalibrasi Sensor

Untuk kalibrasi sensor CO₂ menggunakan MQ-135, langkah pertama yang perlu dilakukan adalah memanaskan sensor selama 24 jam agar mencapai kondisi stabil. Proses pemanasan ini penting untuk memastikan sensor siap digunakan dan memberikan pembacaan yang konsisten. Setelah sensor dipanaskan, hubungkan sensor ke Arduino dan gunakan perangkat lunak untuk membaca nilai resistansi sensor dalam kondisi udara bersih, yang dikenal sebagai nilai R₀.

$$R_0 = \frac{V_{RL}}{V_{out}} \times R_L$$

Dimana :

V_{RL} adalah tegangan yang diterapkan pada resistor beban (load resistor).

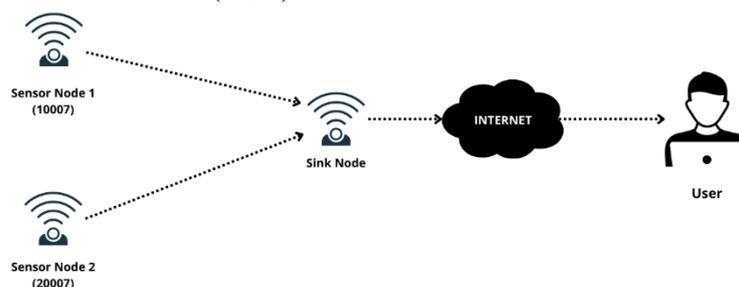
V_{out} adalah tegangan keluaran dari sensor.

R_L adalah nilai resistor beban yang digunakan.

Nilai R₀ ini merupakan kunci untuk kalibrasi, karena akan digunakan sebagai referensi untuk mengukur konsentrasi CO₂ yang sebenarnya di udara. Setelah mendapatkan nilai R₀, Anda harus memperbarui nilai tersebut di dalam pustaka sensor yang digunakan dalam kode Arduino. Ini memastikan bahwa perhitungan konsentrasi CO₂ akan berdasarkan nilai resistansi yang sesuai dengan kondisi lingkungan saat ini.

Dengan memperbarui nilai R₀ dalam pustaka, sensor MQ-135 akan mampu memberikan pembacaan CO₂ yang lebih akurat. Kalibrasi ini memastikan bahwa sensor akan lebih sensitif dan tepat dalam mendeteksi perubahan konsentrasi CO₂. Ini penting untuk mendapatkan data yang valid dalam pemantauan kualitas udara atau aplikasi lingkungan lainnya. Setelah kalibrasi selesai, sensor siap digunakan untuk pengukuran CO₂ yang akurat dan handal.

Konfigurasi Wireless Sensor Network (WSN)



Gambar 4. Alur Wireless Sensor Network

Dalam konfigurasi Wireless Sensor Network (WSN) untuk monitoring CO₂ menggunakan modul NRF24L01+, terdapat dua transmitter yang masing-masing memiliki alamat unik. Transmitter pertama diatur dengan alamat 10007, dan transmitter kedua dengan alamat 20007. Alamat unik ini memastikan bahwa data dari masing-masing transmitter dapat diidentifikasi dengan jelas oleh modul penerima. Ketika transmitter mengirimkan data nirkabel, informasi alamat ini disertakan dalam sinyal untuk membedakan sumber data. Modul penerima yang terhubung ke unit kontrol, seperti Arduino, memonitor saluran frekuensi yang sama dan menerima sinyal dari kedua transmitter.

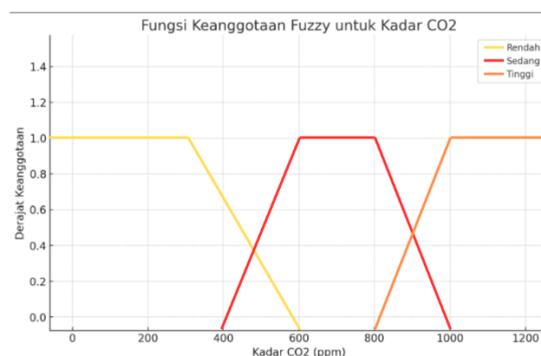
Setelah menerima data dari kedua transmitter, modul penerima mengirimkan informasi ini ke unit kontrol untuk diproses. Unit kontrol kemudian memisahkan dan menganalisis data berdasarkan alamat transmitter yang bersangkutan. Dengan konfigurasi ini, sistem dapat memantau kadar CO₂ dari berbagai lokasi secara terpisah, menyediakan data yang lebih terperinci dan memungkinkan penyesuaian atau tindakan yang lebih tepat berdasarkan informasi dari masing-masing sensor CO₂.

Perancangan Fuzzy Logic

Dalam sistem pengendalian CO₂ berbasis fuzzy logic, kadar CO₂ yang terukur dikategorikan untuk menentukan rekomendasi tindakan yang sesuai. Berdasarkan keterangan yang diberikan, sistem fuzzy membagi kadar CO₂ menjadi tiga kategori utama: Tinggi, Sedang, dan Rendah. Untuk kadar CO₂ yang melebihi 1000 ppm, sistem mengklasifikasikan nilai tersebut dalam kategori Tinggi. Pada kondisi ini, sistem merekomendasikan tindakan segera yaitu "Buka ventilasi udara" Hal ini penting untuk mengurangi kadar CO₂ yang sangat tinggi dan mencegah potensi risiko bagi tanaman.

Jika kadar CO₂ berada dalam rentang 601 hingga 1000 ppm, sistem mengategorikannya sebagai Sedang. Dalam situasi ini, rekomendasi yang diberikan adalah "Monitor dan atur sesuai kebutuhan." Kategori ini menunjukkan bahwa kadar CO₂ berada pada tingkat yang memerlukan perhatian, tetapi tidak kritis, sehingga pemantauan dan penyesuaian diperlukan untuk menjaga kondisi yang optimal. Ketika kadar CO₂ berada pada 600 ppm atau kurang, sistem mengklasifikasikan nilai tersebut sebagai Rendah. Rekomendasi untuk kategori ini adalah "Tidak perlu aksi." Ini menunjukkan bahwa kadar CO₂ berada dalam batas yang aman dan tidak memerlukan tindakan tambahan.

1. Fungsi Keanggotaan Fuzzy



Gambar 5. Grafik Fungsi Keanggotaan Fuzzy

Dari grafik fungsi keanggotaan yang terdapat pada gambar 6, kita dapat melihat bagaimana kadar CO₂ dikelompokkan dalam tiga kategori fuzzy: Rendah, Sedang, dan Tinggi. Untuk kategori "Rendah," fungsi keanggotaan dimulai dari 1 untuk kadar CO₂ hingga 400 ppm dan menurun linier hingga mencapai 0 pada 600 ppm. Kategori "Sedang" menunjukkan fungsi keanggotaan yang adalah 0 di bawah 400 ppm, meningkat linier dari 0 menjadi 1 antara 400 hingga 800 ppm, dan kemudian menurun linier dari 1 menjadi 0 antara 800 hingga 1000 ppm. Sementara itu, untuk kategori "Tinggi," fungsi keanggotaan mulai dari 0 untuk kadar CO₂ di bawah 800 ppm, meningkat linier dari 0 menjadi 1 antara 800 hingga 1000 ppm, dan tetap 1 untuk kadar CO₂ di atas 1000 ppm. Grafik ini memberikan visualisasi yang jelas tentang bagaimana kadar CO₂ mempengaruhi tingkat keanggotaan fuzzy dan rekomendasi yang relevan berdasarkan kategori tersebut.

2. Aturan Fuzzy

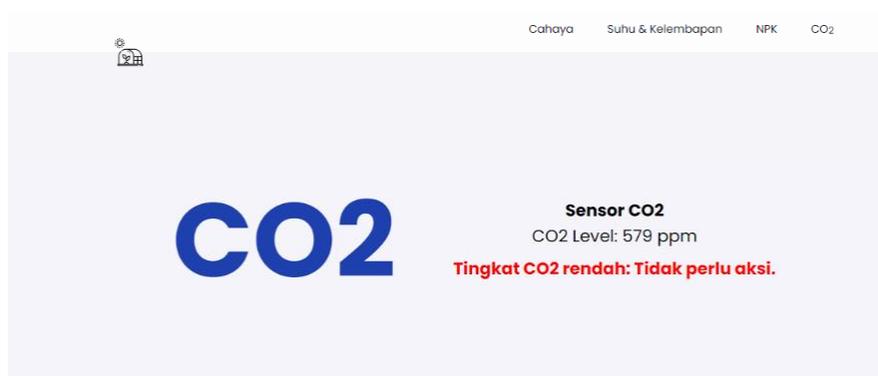
Tabel berikut merangkum aturan fuzzy yang diterapkan dalam sistem ini:

Kadar CO ₂	Tingkat CO ₂	Rekomendasi
≤ 600 ppm	Rendah	Tidak perlu aksi
400 - 1000 ppm	Sedang	Monitor dan waspada
> 800 ppm	Tinggi	Buka ventilasi udara

Tabel 1. Aturan Fuzzy

Tabel ini menjelaskan batasan kadar CO₂ dalam ppm (parts per million) yang ditentukan untuk setiap kategori. Kategori tersebut merupakan tingkat CO₂ dalam sistem fuzzy, yang menunjukkan tingkat kritis dari kadar CO₂. Berdasarkan kategori tingkat CO₂ ini, tabel juga memberikan rekomendasi tindakan yang disarankan.

Antarmuka Pengguna



Gambar 6. Antarmuka Pengguna

Tampilan antarmuka pengguna di atas terdiri dari beberapa elemen kunci yang menyajikan informasi penting mengenai kadar CO₂. Di bagian atas, terdapat label "CO₂ Level" yang menunjukkan konsentrasi CO₂ dalam satuan ppm (parts per million). Di bawah label ini, indikator "Tingkat CO₂" memberikan status yang bisa berupa "Rendah" atau "Tinggi," menggambarkan apakah kadar CO₂ berada dalam rentang aman atau memerlukan perhatian lebih. Di bagian bawah indikator, terdapat teks "Aksi" yang memberikan rekomendasi tindakan berdasarkan tingkat CO₂ yang terdeteksi, seperti meningkatkan ventilasi atau melakukan penyesuaian lainnya. Dengan tampilan ini, antarmuka pengguna memudahkan pemantauan dan pengelolaan kualitas udara secara efisien.

4. Evaluasi

Pada bagian ini hasil pengujian dari implementasi sistem IoT untuk monitoring dan sistem rekomendasi pemberian kadar CO₂ pada tanaman anggur menggunakan WSN dianalisis secara mendalam. Pengujian mencakup evaluasi komponen yang digunakan dalam penelitian ini. Data yang terkumpul dari pengujian ini diproses untuk mengevaluasi efektivitas sistem dalam memberikan rekomendasi jumlah CO₂ yang optimal untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman anggur. Selain itu, evaluasi juga mencakup pengujian keandalan sistem dalam kondisi berbeda-beda. Hasil evaluasi ini menjadi dasar untuk memvalidasi keunggulan dan keandalan sistem IoT dalam mendukung pertanian presisi dan memberikan kontribusi positif terhadap efisiensi penggunaan sumber daya pertanian serta hasil panen yang optimal.

Hasil Perancangan Prototype



(a)



(b)

Gambar 7. Prototype Sistem (a) Transmitter, (b) Receiver

Dari gambar 7 bisa dilihat jika prototipe alat ini terdiri dari dua bagian utama: transmitter dan receiver. Pada bagian transmitter, sensor MQ-135 yang digunakan untuk mengukur kadar CO₂ terkoneksi dengan modul NRF24L01+ yang terhubung ke Arduino Uno. Data dari sensor ini kemudian dikirim secara nirkabel melalui NRF24L01+ (Transmitter) ke bagian receiver. Pada bagian receiver, data diterima oleh NRF24L01+ (Receiver) yang terhubung ke Arduino Uno lainnya. Arduino Uno (Receiver) ini kemudian meneruskan data ke ESP-32, yang menggunakan koneksi WiFi untuk mengirim data tersebut ke Firebase. Firebase berfungsi sebagai platform untuk menyimpan data yang diterima dari ESP-32, dan data yang tersimpan di Firebase kemudian dapat diakses dan ditampilkan melalui sebuah website untuk pemantauan dan analisis lebih lanjut.

Hasil Pengujian

No.	Sensor ke-	Kadar CO ₂	Jam	Kondisi	Output Rekomendasi
1.	1	515 ppm	09.00	Normal	Tidak perlu aksi.
2.	2	522 ppm	09.10	Normal	Tidak perlu aksi.
3.	1	540 ppm	10.00	Normal	Tidak perlu aksi.
4.	2	559 ppm	10.10	Normal	Tidak perlu aksi.
5.	1	532 ppm	11.00	Normal	Tidak perlu aksi.
6.	2	560 ppm	11.10	Normal	Tidak perlu aksi.
7.	1	510 ppm	12.00	Normal	Tidak perlu aksi.
8.	2	531 ppm	12.10	Normal	Tidak perlu aksi.
9.	1	489 ppm	13.00	Normal	Tidak perlu aksi.
10.	2	499 ppm	13.10	Normal	Tidak perlu aksi.

Hasil Percobaan Pengujian Fuzzy

Pengujian ke-	Kadar CO ₂	Kondisi Fuzzy	Output Rekomendasi
1	100 ppm	Rendah	Tidak perlu aksi
2	200 ppm	Rendah	Tidak perlu aksi
3	600 ppm	Sedang	Monitor dan waspada
4	700 ppm	Sedang	Monitor dan waspada
5	1000 ppm	Tinggi	Buka ventilasi udara
6	1200 ppm	Tinggi	Buka ventilasi udara

Analisis Hasil Pengujian

Dalam analisis hasil pengujian, data sensor CO₂ menunjukkan kadar CO₂ berkisar antara 489 ppm hingga 560 ppm, yang semuanya dalam kategori "Normal" dan tidak memerlukan tindakan tambahan. Hasil pengujian fuzzy menunjukkan bahwa pada kadar CO₂ rendah (100 - 200 ppm), sistem merekomendasikan "Tidak perlu aksi". Pada

kadar CO₂ sedang (600 - 700 ppm), sistem merekomendasikan "Monitor dan waspada," namun, mungkin lebih baik jika sistem juga merekomendasikan peningkatan ventilasi untuk mencegah kenaikan kadar CO₂ lebih lanjut. Untuk kadar CO₂ tinggi (1000 - 1200 ppm), sistem memberikan rekomendasi yang tepat yaitu "Buka ventilasi udara," yang efektif untuk menurunkan kadar CO₂ tinggi.

Secara keseluruhan, sistem fuzzy menunjukkan rekomendasi yang sesuai untuk kadar CO₂ tinggi dan rendah, tetapi perlu penyesuaian untuk kondisi kadar CO₂ sedang agar rekomendasi lebih komprehensif dan efektif.

5. Kesimpulan

Kesimpulan dari data yang diberikan menunjukkan bahwa kadar CO₂ terukur berkisar antara 489 ppm hingga 560 ppm sepanjang rentang waktu dari pukul 09.00 hingga 13.10. Selama periode ini, semua nilai CO₂ berada dalam kisaran yang dianggap aman untuk kondisi normal tanaman anggur, yaitu tidak melebihi batas yang dapat mengganggu pertumbuhan tanaman. Oleh karena itu, tidak ada tindakan khusus yang diperlukan untuk mengatur kadar CO₂, dan rekomendasi untuk tidak melakukan aksi lebih lanjut adalah tepat. Dengan kata lain, data menunjukkan bahwa kadar CO₂ tetap berada dalam batas yang dapat diterima dan tidak memerlukan intervensi tambahan seperti ventilasi atau pengurangan kadar CO₂.

Implementasi IoT dengan menggunakan Wireless Sensor Network (WSN) untuk monitoring dan sistem rekomendasi pemberian kadar CO₂ pada tanaman anggur diharapkan efektif dalam meningkatkan efisiensi pertanian. Sistem ini memungkinkan pemantauan kondisi lingkungan secara real-time dan memberikan informasi yang akurat serta tepat waktu kepada petani. Integrasi teknologi sensor dan komputasi dalam sistem ini tidak hanya memperbaiki manajemen pertanian, tetapi juga mengoptimalkan penggunaan sumber daya dan meningkatkan hasil panen. Penggunaan data sensor untuk rekomendasi kadar CO₂ menunjukkan potensi besar untuk pengembangan lebih lanjut dalam aplikasi IoT, yang dapat meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan pertanian di masa depan.

Daftar Pustaka

- [1] B. Harsanto, "Inovasi Internet of Things pada Sektor Pertanian: Pendekatan Analisis Scientometrics," *Informatika Pertanian*, vol. 29, no. 2, pp. 111-122, 2020. doi: 10.21082/ip.v29n2.2020.p111-122.
- [2] W. A. Kuncoro, S. N. Hertiana, and S. Raniprima, "Rancang Bangun Sistem Kendali dan Pemantau Kebutuhan Tanaman Aquascape Berbasis IoT dengan Aplikasi Android," *eProceedings of Engineering*, vol. 9, no. 6, 2022.
- [3] R. Fiqraini, et al., "Monitoring Peningkatan Kualitas Udara Indoor dengan Sensor Gas MQ135 melalui Reduksi CO₂ Menggunakan Tanaman *Aglaonema commutatum* Schott."
- [4] A. Sumarudin, W. P. Putra, E. Ismantohadi, S. Supardi, and M. Qomarrudin, "Sistem Monitoring Tanaman Hortikultura Pertanian di Kabupaten Indramayu Berbasis Internet of Things," *Jurnal Teknologi Dan Informasi*, vol. 9, no. 1, 2019. doi: 10.34010/jati.v9i1.1447.
- [5] B. Darmawan and S. Ariessaputra, "Rancang Bangun Monitoring dan Kontrol Suhu, Kelembaban, dan Kadar CO₂ pada Ruang Budidaya Jamur King Oyster (*Pleurotus Eryngii*) Berbasis IoT," *JEITECH (Journal of Electrical Engineering And Information Technology)*, vol. 1, no. 2, pp. 23-29, 2023.
- [6] A. R. Febriansyah, R. I. Ergantara, and P. Nasoetion, "Daya Serap CO₂ Tanaman Pengisi Ruang Terbuka Hijau (RTH) Privat Rumah Besar Perumahan Springhill dan Citra Mas di Kelurahan Kemiling Permai," *Jurnal Rekayasa, Teknologi, dan Sains*, vol. 6, no. 1, pp. 20-31, 2022.
- [7] S. Mayasari, S. Sudarti, and Y. Yushardi, "Analisis Hubungan Intensitas Panas Energi Matahari dengan Proses Fotosintesis pada Tanaman Padi," *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*, vol. 9, no. 1, pp. 70-76, 2023.
- [8] F. Novariansyah, *Perancangan Sistem Penanganan Kelembaban dan Gas CO₂ pada Aplikasi Controlled Atmosphere Storage (CAS) untuk Produk Hortikultura*, M.S. thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2024.
- [9] E. Habibah, *Perhitungan Potensi Mikroalga *Chlorella* sp. Menggunakan Desain Fotobioreaktor Halte Trans-Jogja Berdasarkan Fotoperiode Alami dan Penyerapan CO₂ di Yogyakarta*, M.S. thesis, Universitas Gadjah Mada, 2021.
- [10] P. K. Tripathy, et al., "MyGreen: An IoT-enabled Smart Greenhouse for Sustainable Agriculture," *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 10, no. 4, pp. 57-62, 2021.
- [11] L. T. Permana, R. Wirawan, and N. Qomariyah, "Rancang Bangun Sistem Pendeteksi Penyerapan Gas Karbondioksida (CO₂) oleh Tumbuhan Menggunakan Sensor MH-Z19," *Indonesian Physical Review*, vol. 4, no. 2, 2021. doi: 10.29303/ipr.v4i2.81.
- [12] A. Shishegaran, A. Shishegaran, M. Najari, A. Ghotbi, and A. N. Boushehri, "Effect of Plants on an Environment with High Carbon Dioxide Concentration," *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 1, 2020. doi: 10.1016/j.clet.2020.100002.

- [13] P. Nastiti, "Penerapan Metode Content Based Filtering dalam Implementasi Sistem Rekomendasi Tanaman Pangan," *Teknika*, vol. 8, no. 1, pp. 1-10, 2019.
- [14] F. X. Ming, A. R. A. Habeeb, F. H. B. Md Nasaruddin, and A. bin Gani, "Real-time Carbon Dioxide Monitoring Based on IoT & Cloud Technologies," *ACM International Conference Proceeding Series*, Part F147956, 2019. doi: 10.1145/3316615.3316622.
- [15] H. Benyezza, M. Bouhedda, R. Kara, and S. Rebouh, "Smart Platform Based on IoT and WSN for Monitoring and Control of a Greenhouse in the Context of Precision Agriculture," *Internet of Things (Netherlands)*, vol. 23, 2023. doi: 10.1016/j.iot.2023.100830.