



Estimasi Serapan CO₂ melalui Selisih Konsentrasi di Udara dan Tanah: Studi Kasus Pertanian Urban di Depok

Maulana Fakhri Latief^{1*}, Muhammad Irfan Hakim¹, Rusmanto², Rika Rahma¹

¹Program Studi Teknik Informatika, STT Terpadu Nurul Fikri, Indonesia.

²Program Studi Sistem Informasi, STT Terpadu Nurul Fikri, Indonesia.

Artikel Info

Kata Kunci:

Emisi Karbon;
Internet of Things;
Pertanian Urban;
Serapan Karbon;
Sensor CO₂.

Keywords:

Carbon Emission;
Internet of Things;
Urban Farming;
Carbon Sequestration;
CO₂ Sensor.

Riwayat Artikel:

Submitted: 10 Juni 2025

Accepted: 17 Juli 2025

Published: 31 Juli 2025

Abstrak: Perubahan iklim akibat emisi karbon dioksida (CO₂) menjadi isu global. Pertanian urban berpotensi menyerap CO₂ melalui fotosintesis, namun pemantauannya masih terbatas. Penelitian ini mengembangkan sistem pemantauan CO₂ berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan sensor MQ-135 dan mikrokontroler ESP32. Pengukuran dilakukan secara tidak langsung melalui selisih konsentrasi CO₂ antara udara dan tanah. Sistem juga dilengkapi sensor DHT22 dan YL-69 untuk memantau suhu, kelembapan udara, dan kelembapan tanah. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen kuantitatif dengan implementasi sistem di lahan pertanian urban Depok selama tiga hari. Data dikumpulkan setiap jam pada pagi, siang, dan sore, lalu dikirim otomatis ke platform pemantauan.com. Hasil menunjukkan penurunan selisih CO₂ pada sore hari, mengindikasikan peningkatan fotosintesis. Sistem ini efektif untuk pemantauan karbon berkelanjutan dan potensial untuk skema kredit karbon.

Abstract: Climate change caused by carbon dioxide (CO₂) emissions has become a global issue. Urban agriculture has the potential to absorb CO₂ through photosynthesis, but its monitoring remains limited. This study develops a CO₂ monitoring system based on the Internet of Things (IoT) using MQ-135 sensors and an ESP32 microcontroller. Measurements are conducted indirectly by calculating the difference in CO₂ concentration between air and soil. The system is also equipped with DHT22 and YL-69 sensors to monitor temperature, air humidity, and soil moisture. A quantitative experimental method was applied by implementing the system in an urban farming area in Depok for three days. Data were collected hourly during morning, afternoon, and evening sessions, then automatically transmitted to the pemantauan.com platform. The results show a decrease in CO₂ concentration difference in the afternoon, indicating increased photosynthetic activity. This system effectively supports sustainable carbon monitoring and has the potential to contribute to carbon credit schemes.

Corresponding Author:

Maulana Fakhri Latief

Sekolah Tinggi Teknologi Terpadu Nurul Fikri

Alamat: Jl. Lenteng Agung Raya No.20, RT.5/RW.1, Lenteng Agung, Srengseng Sawah, Kec. Jagakarsa, Kota Jakarta Selatan, Daerah Khusus Ibukota Jakarta 12640

Email: maulana.latief@nurulfikri.ac.id

PENDAHULUAN

Perubahan iklim telah memberikan dampak signifikan terhadap berbagai sektor kehidupan, termasuk lingkungan, kesehatan, dan ketahanan pangan. Salah satu penyebab utama perubahan iklim adalah meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca (GRK) di atmosfer, khususnya karbon dioksida (CO₂) yang dihasilkan dari berbagai aktivitas manusia seperti pembakaran bahan bakar fosil dan deforestasi (Raj & Raman, 2017). Sektor pertanian, selain sektor energi dan industri, memegang peran penting dalam siklus karbon. Di satu sisi, sektor ini merupakan sumber emisi GRK, namun di sisi lain memiliki potensi sebagai penyerap karbon melalui proses fotosintesis tanaman yang mengubah CO₂ menjadi biomassa (Morchid et al., 2023). Dalam konteks urbanisasi yang terus berkembang, pertanian urban menjadi salah satu pendekatan alternatif untuk menjawab tantangan lingkungan dan sosial. Praktik ini melibatkan budidaya tanaman di lingkungan perkotaan dengan memanfaatkan lahan sempit seperti pekarangan rumah, atap bangunan, dan area publik terbatas (Kurniawan et al., 2021). Selain meningkatkan ketahanan pangan lokal, pertanian urban juga berkontribusi pada peningkatan kualitas udara melalui penyerapan karbon. Tanaman yang dibudidayakan di area perkotaan mampu menyerap CO₂ dan menghasilkan oksigen sebagai bagian dari proses metabolisme alamnya (Guan, 2024).

Namun demikian, potensi kawasan pertanian urban sebagai penyerap karbon belum dimanfaatkan secara optimal. Kota-kota padat penduduk seperti Kota Depok menghadapi tantangan dalam memantau serapan karbon secara akurat dan berkelanjutan, karena keterbatasan sistem pemantauan yang andal dan berbasis data langsung (Mardiana et al., 2024). Selama ini, metode konvensional seperti estimasi biomassa kering dan penggunaan indeks vegetasi masih banyak digunakan untuk mengukur serapan karbon. Sayangnya, pendekatan ini bersifat manual, kurang efisien, dan tidak dapat memberikan informasi secara langsung. Perkembangan teknologi digital memberikan peluang baru dalam upaya pemantauan lingkungan, khususnya melalui pemanfaatan Internet of Things (IoT). Teknologi ini memungkinkan pengumpulan dan transmisi data secara otomatis, kontinu, dan terintegrasi dalam sistem berbasis jaringan (Amane et al., 2023; Raj & Raman, 2017). IoT dalam bidang pertanian telah banyak digunakan untuk mendeteksi dan memantau parameter lingkungan penting seperti suhu udara, kelembapan tanah, intensitas cahaya, serta kelembapan relatif yang berpengaruh terhadap pertumbuhan tanaman (Sitanggang et al., 2022).

Teknologi sensor gas yang terintegrasi dengan sistem Internet of Things (IoT) memungkinkan pengukuran langsung kualitas udara dan konsentrasi gas seperti karbon dioksida (CO₂) maupun karbon monoksida (Nikolic et al., 2020; Kurniawan et al., 2021). Beberapa jenis sensor, seperti MQ-135, MQ-7, dan DHT22, dapat digunakan untuk memantau fluktuasi kadar CO₂ secara langsung. Sensor-sensor ini dihubungkan dengan mikrokontroler seperti ESP32, sehingga memungkinkan pengiriman data secara langsung ke platform digital dengan biaya rendah dan efisiensi tinggi (Suningrat, Calvinus, & Fat, 2022; Nugraha et al., 2024). Penerapan sistem ini telah menunjukkan keberhasilan dalam berbagai studi pemantauan kualitas udara dan lingkungan (Sari et al., 2024; Sitanggang et al., 2022). Namun, penerapan secara spesifik untuk memantau serapan karbon di kawasan pertanian urban masih jarang dilakukan di Indonesia (Refalista et al., 2023).

Sistem pemantauan serapan karbon berbasis IoT memiliki potensi besar untuk mendukung kebijakan pembangunan kota hijau dan pertanian berkelanjutan. Informasi yang dikumpulkan secara otomatis dapat menjadi dasar pengambilan keputusan dalam pengelolaan lingkungan dan pengurangan emisi karbon (Refalista et al., 2023). Dengan memanfaatkan sensor lingkungan yang terintegrasi dalam sistem jaringan, teknologi IoT mampu mengubah cara pengumpulan, analisis, dan visualisasi data lingkungan secara langsung, termasuk dalam konteks pemantauan karbon (Morchid et al., 2023; Hosseini et al., 2024).

Penelitian ini dilakukan dengan mengimplementasikan sistem pemantauan serapan karbon berbasis IoT pada satu titik lahan pertanian urban di Depok, menggunakan sensor MQ-135 untuk udara dan tanah, serta sensor DHT22 dan YL-69 untuk memantau suhu dan kelembapan. Sistem ini dirancang untuk mengestimasi serapan karbon secara tidak langsung melalui pemantauan perubahan konsentrasi CO₂ pada interval waktu tertentu (Andriani & Prasetyo, 2023). Tujuan penelitian ini adalah merancang dan menguji sistem pemantauan karbon yang mampu memberikan data secara langsung, sehingga

dapat menjadi referensi dalam pengembangan kawasan urban berkelanjutan dan mitigasi perubahan iklim di tingkat lokal (Hosseini et al., 2024; Taufiq et al., 2024).

METODE

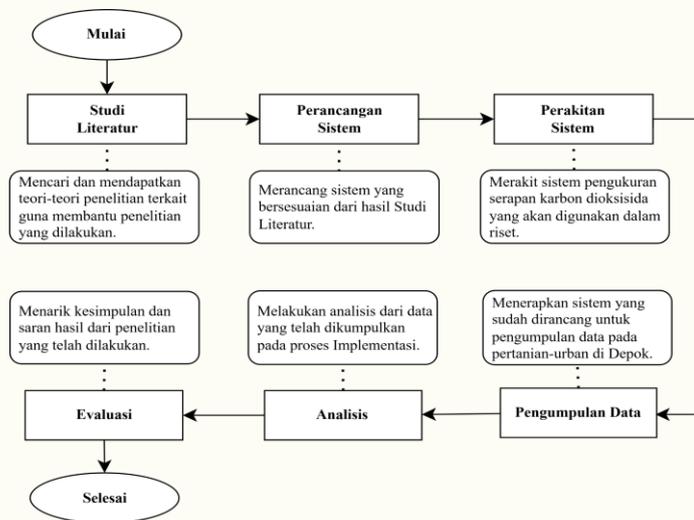
Pada bagian ini akan dijelaskan secara sistematis mengenai jenis penelitian, tahapan penelitian, rancangan sistem pengukuran serapan karbon berbasis IoT, alur pengumpulan data beserta lokasi serta waktu pelaksanaan, analisis data, hingga evaluasi sistem yang dikembangkan. Pemilihan desain penelitian didasarkan pada kebutuhan untuk menghasilkan sistem yang mampu melakukan estimasi serapan karbon secara otomatis, berkelanjutan, dan akurat di lingkungan pertanian urban. Oleh karena itu, pendekatan kuantitatif terapan dipilih karena memungkinkan pengukuran, pengujian, dan analisis hubungan antar variabel lingkungan secara objektif.

Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif terapan yang berfokus pada pengembangan dan pengujian sistem berbasis Internet of Things (IoT) untuk mengestimasi serapan karbon pada pertanian urban. Penelitian dilakukan secara eksperimental di lapangan dengan pendekatan pengukuran tidak langsung, yaitu berdasarkan perbedaan konsentrasi karbon dioksida (CO₂) di udara dan di dalam tanah, yang dikorelasikan dengan parameter lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan intensitas cahaya.

Tahapan Penelitian

Penelitian ini memiliki 6 tahapan: Studi Literatur, Perancangan Sistem, Perakitan Sistem, Pengumpulan Data, Analisis, Evaluasi. Proses dari tiap tahapan penelitian ini dijelaskan secara detail pada Gambar 1.



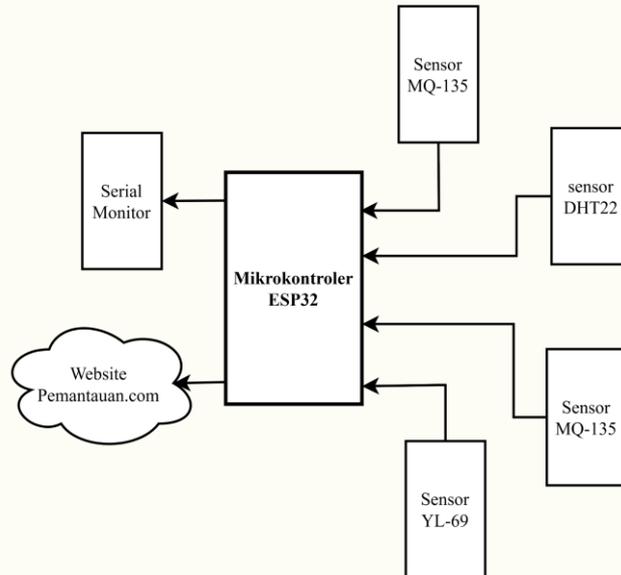
Gambar 1. Tahapan Penelitian

Gambar 1 menunjukkan alur tahapan yang dilakukan pada penelitian ini. Secara singkat dijelaskan beberapa proses dan tahapan yang dijalankan pada penelitian ini. Dimulai dari tahap pertama yaitu melakukan studi literatur untuk membantu mendapatkan bahan teori-teori penelitian terkait. Setelah hasil studi literatur didapatkan lalu pada tahap kedua yaitu analisis melakukan observasi terhadap data dan informasi guna menyiapkan alat serta sensor apa saja yang akan digunakan pada penelitian ini. Pada tahap ketiga yaitu perancangan sistem dengan menghubungkan pusat pengelolaan dan controlling yaitu ESP32 serta sensor yang digunakan akan dihubungkan guna dilakukan pengujian kode program pada aplikasi yang tersedia yaitu Arduino IDE. Pada tahap keempat adalah implementasi sistem. Setelah sistem berhasil dirancang dan diprogram akan dilakukan pengujian pada salah satu sektor pertanian dalam kurun waktu satu tiga hari lalu data akan diunggah dan dipantau secara online melalui platform yang sudah disediakan, yaitu pemantauan.com. Tahap

kelima dilakukan pengujian sistem dilapangan yaitu pada sektor pertanian yang akan dilakukan pengukuran serapan dan emisi karbon pada lokasi, pertanian tersebut lalu data akan dipantau secara berkala. Terakhir adalah evaluasi sistem dengan menarik kesimpulan dari hasil data yang didapat tersebut akan dilakukan perhitungan karbondioksida (CO₂) yang dihasilkan agar dapat diketahui data serapan dan emisi karbon pada sektor pertanian tersebut.

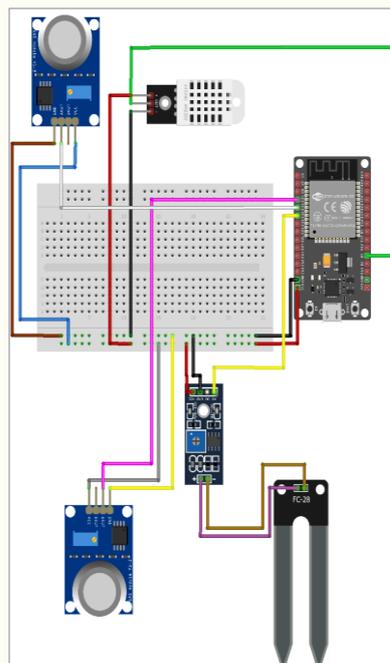
Rancangan Sistem

Dengan mengacu pada parameter yang diukur seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, maka rancangan diagram blok sistem diperlihatkan oleh Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Blok Sistem

Gambar 2 di atas terlihat komponen penyusun sistem dengan pusat kendali menggunakan mikrokontroler ESP32. Pada Gambar 2, ditampilkan bentuk rangkaian elektronika yang disusun berdasarkan rancangan diagram blok sistem.



Gambar 3. Rangkaian Elektronika Sistem

Gambar 3 di atas merupakan tampilan rangkaian elektronika sistem alat pengukuran kadar gas karbondioksida (CO₂), suhu dan kelembapan udara dan kelembapan tanah menggunakan ESP32 sebagai pusat kendali yang berbasis *Internet of Things* (IoT). ESP32 digunakan sebagai mikrokontroler penerima dan pengelola data sensor yang kemudian dikirimkan ke internet. Sensor MQ-135 sebanyak 2 buah digunakan untuk pembacaan kadar gas karbondioksida di udara dan di bawah tanah. Sensor DHT22 digunakan untuk pengukur suhu serta kelembapan udara di tempat pengujian alat berlangsung. Sensor YL-69 akan digunakan untuk mendeteksi kadar kelembapan tanah.

Alur Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan pada lahan pertanian urban yang berlokasi di Jl. Insiyur H. Juanda kota Depok. Lahan pertanian ini merupakan lahan pertanian yang menjadi salah satu program ketahanan pangan nasional yang dikelola oleh Kodim 0508 Depok. Pengujian dilakukan dalam kurun waktu 3 hari pada tanggal 12-14 Mei 2025 pada rentang waktu setiap satu jam pada pagi, siang dan sore hari. Parameter yang diukur meliputi konsentrasi CO₂ di udara, konsentrasi CO₂ di dalam tanah, suhu dan kelembapan udara, dan kelembapan tanah.

Analisis Data

Estimasi serapan karbon dilakukan berdasarkan perbedaan konsentrasi karbon dioksida (CO₂) antara udara dan tanah pada waktu tertentu. Data yang diperoleh dari sensor MQ-135 diolah untuk menghitung selisih konsentrasi CO₂ (ΔCO_2) dengan formula:

$$\Delta\text{CO}_2 = \text{CO}_2 \text{ udara} - \text{CO}_2 \text{ tanah}$$

Selisih ini digunakan sebagai indikator tidak langsung terhadap serapan karbon oleh tanaman melalui proses fotosintesis. Untuk memperoleh estimasi nilai serapan karbon dalam satuan mg/m²/jam, dilakukan konversi dari ppm ke massa CO₂ dengan mempertimbangkan volume udara yang terserap oleh tanaman serta waktu pengukuran, menggunakan pendekatan berikut:

$$\text{Fluks CO}_2 \text{ (mg/m}^2\text{/jam)} \approx \Delta\text{CO}_2 \times \text{faktor konversi ppm ke mg/m}^3 \times \text{volume udara per m}^2 / \text{waktu}$$

Data diklasifikasikan berdasarkan waktu pengambilan (pagi, siang, sore) untuk melihat dinamika harian proses serapan karbon. Selain itu, dilakukan analisis tren untuk mengidentifikasi korelasi antara parameter lingkungan seperti suhu, kelembapan udara, dan kelembapan tanah terhadap nilai ΔCO_2 . Analisis ini bertujuan mengevaluasi seberapa besar pengaruh kondisi iklim terhadap laju fotosintesis. Selanjutnya, dilakukan perbandingan hasil estimasi dengan referensi literatur atau pendekatan biomassa guna menilai akurasi metode tidak langsung ini.

Evaluasi Sistem

Evaluasi dilakukan untuk menguji keandalan dan efektivitas sistem, yang meliputi evaluasi fungsional dan evaluasi akurasi. Evaluasi fungsional, yaitu mengamati kestabilan perangkat dalam mengukur dan mengirimkan data secara otomatis tanpa intervensi manual, serta konsistensi data dari berbagai sensor. Sedangkan evaluasi akurasi, yaitu perbandingan antara hasil estimasi serapan karbon dengan data pembanding dari literatur atau perhitungan biomassa aktual. Evaluasi ini membantu menilai sejauh mana sistem dapat digunakan sebagai alat bantu pengambilan keputusan dalam praktik pertanian berkelanjutan.

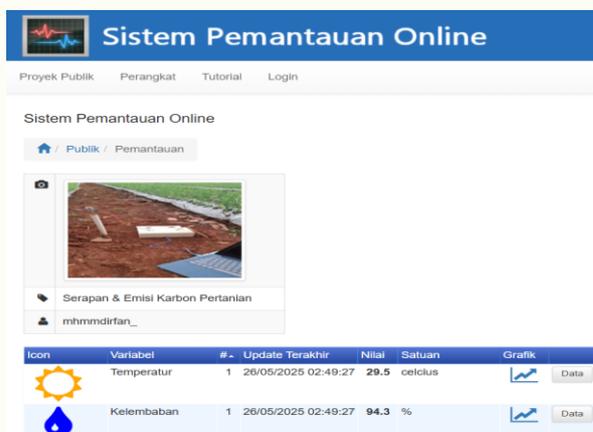
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengumpulan data dilakukan pada lahan pertanian urban yang berlokasi di Jl. Insinyur H. Juanda kota Depok. Lahan pertanian ini merupakan lahan pertanian yang menjadi salah satu program ketahanan pangan nasional yang dikelola oleh Kodim 0508 Depok. Pengujian dilakukan dalam kurun waktu 3 hari pada tanggal 12-14 Mei 2025 pada rentang waktu setiap satu jam pada pagi, siang dan sore hari. Data dikumpulkan oleh ESP32 sebagai mikrokontroler yang terhubung dengan sensor-sensor tersebut, kemudian data hasil pengukuran ditampilkan pada serial monitor dan dikirimkan ke platform pemantauan.com yang nantinya data bisa dilihat secara table dan grafik untuk selanjutnya dilakukan analisis lanjutan.



Gambar 4. Pengambilan Data di Lokasi Pertanian urban Kota Depok

Gambar 4 memperlihatkan proses pengambilan data di lokasi pertanian urban Kota Depok. Pada gambar terlihat perangkat pengukuran berbasis IoT yang terdiri dari sensor CO₂, sensor kelembapan tanah, dan mikrokontroler ESP32 yang terhubung dengan laptop untuk pemantauan dan pencatatan data secara langsung. Alat ini diletakkan di atas tanah di area pertanian, dengan sensor CO₂ udara dan tanah ditempatkan sesuai fungsinya. Pengambilan data dilakukan secara sistematis pada waktu pagi, siang, dan sore sesuai dengan jadwal pengukuran yang telah ditetapkan. Gambar ini menunjukkan penerapan teknologi IoT yang memungkinkan proses pengukuran konsentrasi CO₂ dan parameter lingkungan lainnya berlangsung otomatis, efisien, dan minim intervensi manual.



Gambar 5. Tampilan Pemantauan Suhu dan Kelembapan Online

Waktu	Nilai	GeoTag X	GeoTag Y
26/05/2025 02:49:27	29.5		
26/05/2025 02:48:24	29.6		
26/05/2025 02:47:21	29.5		
26/05/2025 02:46:18	29.5		
26/05/2025 02:45:15	29.5		
26/05/2025 02:44:12	29.5		
26/05/2025 02:43:09	29.5		
26/05/2025 02:42:06	29.5		
26/05/2025 02:41:03	29.6		
26/05/2025 02:40:01	29.6		

Gambar 6. Tampilan Data Pemantauan Suhu dan Kelembapan Online

Gambar 5 dan Gambar 6 merupakan tampilan dan data pemantauan suhu dan kelembapan pada

web pemantauan.com. setiap data yang dihasilkan dari sensor akan langsung dikirim ke web bersama dengan waktu pembacaan sensor data pada platform pemantauan.com dapat ditampilkan sebanyak 1000 data dan akan diperbarui jika mendapat status code 200 dan terhubung dengan jaringan wifi. Data *sensor* juga dapat di ekspor ke file csv untuk memudahkan dalam mengelola data dan tindakan analisis lanjutan. Dengan berhasilnya pengiriman data dan data dapat terlihat pada platform pemantauan.com bisa dikatakan bahwa sistem dan *prototype* yang dibuat berhasil terintegrasi dengan IoT dan tingkat efektivitas pengujian serta hasil data pengukuran 100% berhasil.

Tabel 1. Hasil Pengumpulan Data Pagi Hari

Waktu	Suhu (°C)	Kelembapan Udara (%)	Kelembapan Tanah (%)	CO ₂ Udara (ppm)	CO ₂ Tanah (ppm)
08:00	33.2	75	74	1011	602
08:05	34.3	73	74	979	561
08:10	34.7	70	73	1030	575
08:15	32.9	76	72	998	544
08:20	33.9	69	71	974	553
08:25	37.2	62	71	978	586
08:30	39.0	58	70	947	524
08:35	38.5	60	70	937	543
08:40	37.9	59	69	952	524
08:45	37.5	64	70	909	498
08:50	38.4	62	68	943	520
08:55	39.4	59	67	936	522
09:00	38.9	59	67	951	568

Pada tabel 1 menampilkan data nilai pengukuran pada pagi hari pukul 08:00 hingga 09:00, yang mencakup suhu dan kelembapan udara, kelembapan tanah dan kadar CO₂ di udara dan tanah. Dapat dilihat bahwa suhu pada jam tersebut meningkat yang awalnya 33.2°C menjadi 38.9°C, sedangkan kelembapan udara cenderung menurun dari 75% menjadi 59% yang menunjukkan pemanasan lingkungan seiring waktu. Kelembapan tanah pada tanaman juga menurun secara bertahap dari 74% menjadi 67% menunjukkan penguapan air dari tanah yang diakibatkan kenaikan suhu. Konsentrasi CO₂ udara berfluktuasi antara 930-1030 ppm, sedangkan CO₂ pada tanah berada kisaran 498-602 ppm. Konsentrasi CO₂ udara dan tanah menunjukkan selisih yang relatif stabil. Selisih menunjukkan bahwa meskipun terjadi perubahan suhu dan kelembapan, perbedaan CO₂ dari udara dan tanah tidak terlalu ekstrem.

Tabel 2. Hasil Pengumpulan Data Siang Hari

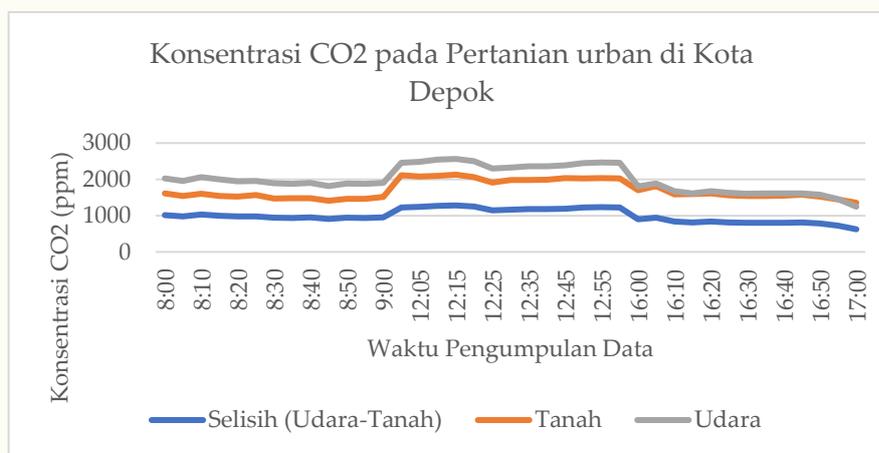
Waktu	Suhu (°C)	Kelembapan Udara (%)	Kelembapan Tanah (%)	CO ₂ Udara (ppm)	CO ₂ Tanah (ppm)
12:00	40.4	61	82	1228	988
12:05	41.2	53	81	1242	833
12:10	38.8	58	82	1271	821
12:15	38.1	60	83	1281	848
12:20	39.2	59	84	1249	809
12:25	39.2	58	86	1149	765
12:30	41.4	57	89	1164	816
12:35	39.5	57	88	1179	804
12:40	39.5	60	89	1179	813
12:45	38.8	59	96	1191	841
12:50	40.5	58	89	1224	799
12:55	38.8	61	89	1233	804
13:00	39.5	61	89	1227	799

Pada tabel 2 menampilkan data nilai pengukuran pada siang hari pukul 12:00 hingga 13:00. Dapat dilihat bahwa suhu udara cenderung tinggi dengan nilai sebesar 38.1°C hingga 41.4°C, sementara kelembapan udara relatif stabil di kisaran 53% hingga 61%. Sedangkan kelembapan tanah pada jam tersebut cenderung naik karena dilakukannya penyiraman pada tanaman pada siang hari. Konsentrasi CO₂ di udara berfluktuasi antara 1149 ppm hingga 1289 ppm, sedangkan konsentrasi CO₂ di tanah menunjukkan penurunan keseluruhan di akhir pengamatan berlangsung.

Tabel 3. Hasil Pengumpulan Data Sore Hari

Waktu	Suhu (°C)	Kelembapan Udara (%)	Kelembapan Tanah (%)	CO ₂ Udara (ppm)	CO ₂ Tanah (ppm)
16:00	32.0	78	72	1065	801
16:05	31.7	80	60	942	871
16:10	30.9	81	57	836	749
16:15	31.1	82	56	807	789
16:20	30.9	80	55	835	780
16:25	31.0	79	52	813	742
16:30	30.7	79	51	800	743
16:35	29.2	85	51	806	739
16:40	28.5	82	50	806	744
16:45	28.6	89	49	808	770
16:50	28.4	85	49	789	739
16:55	28.5	87	49	726	716
17:00	28.4	85	49	623	732

Pada tabel 3 disajikan data hasil nilai pengukuran yang dilakukan pada sore hari pukul 16:00 hingga 17:00 di area pertanian tersebut. Dapat dilihat bahwa pada awal pengukuran suhu menyentuh angka 32°C dan selama pengukuran berlangsung suhu menurun di akhir pada angka 28.4°C sebaliknya pada kelembapan udara jika suhu turun maka kelembapan naik, didapati hasil tersebut karena pada saat pengukuran berlangsung cuaca terlihat mendung dan akan turun hujan. Nilai kelembapan tanah juga menunjukkan tren menurun signifikan. Pada konsentrasi CO₂ di udara fluktuasi kadar CO₂ menurun stabil yang awalnya 1065 ppm menjadi 623 ppm di akhir pengamatan dan konsentrasi kadar CO₂ di tanah mengalami hal serupa.



Gambar 7. Pengambilan Data di Lokasi Pertanian urban Kota Depok

Gambar 7 menampilkan grafik dinamika konsentrasi CO₂ pada lahan pertanian urban di Kota Depok berdasarkan hasil pengukuran menggunakan sistem berbasis IoT. Grafik ini memperlihatkan

tiga kurva utama, yaitu konsentrasi CO₂ di udara (abu-abu), konsentrasi CO₂ di tanah (oranye), dan selisih antara konsentrasi CO₂ udara dan tanah (biru) terhadap waktu pengumpulan data. Dari grafik terlihat bahwa konsentrasi CO₂ di udara secara umum lebih tinggi dibandingkan di tanah sepanjang periode pengamatan. Nilai konsentrasi CO₂ di udara dan tanah mengalami fluktuasi, dengan puncak konsentrasi terjadi pada siang hari, lalu menurun pada sore hari. Selisih antara konsentrasi CO₂ udara dan tanah (garis biru) juga menunjukkan tren menurun dari pagi ke sore hari. Hal ini mengindikasikan bahwa proses fotosintesis tanaman berjalan lebih aktif pada siang hingga sore hari, sehingga semakin banyak CO₂ yang diserap dari udara dan masuk ke dalam tanah.

Tabel 4. Perbandingan Rata-rata Konsentrasi CO₂ terhadap Waktu Pengumpulan Data

Waktu	CO ₂ Udara (ppm)	CO ₂ Tanah (ppm)	ΔCO ₂ (ppm)
Pagi, 08:00 – 09:00	965	548	417
Siang, 12:00 – 13:00	1217	818	398
Sore, 16:00 – 17:00	807	763	45

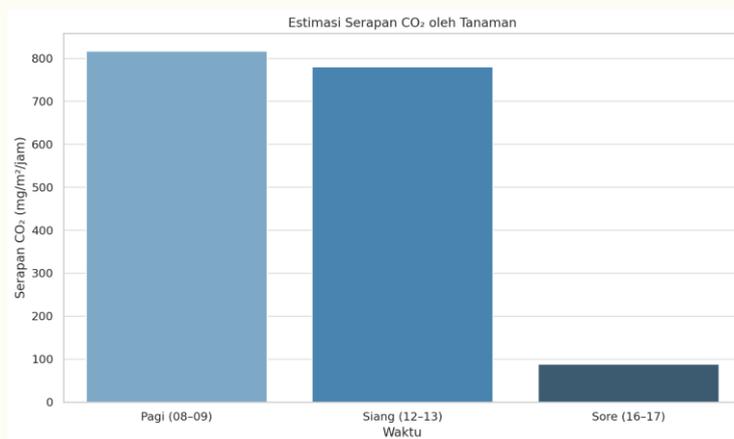
Tabel 4 menampilkan perbandingan rata-rata konsentrasi CO₂ di udara dan tanah pada tiga waktu pengumpulan data, yaitu pagi (08:00–09:00), siang (12:00–13:00), dan sore (16:00–17:00). Data menunjukkan bahwa konsentrasi CO₂ di udara tertinggi terjadi pada siang hari (1217 ppm), sedangkan konsentrasi terendah pada sore hari (807 ppm). Konsentrasi CO₂ di tanah juga mengalami peningkatan dari pagi ke siang hari, lalu sedikit menurun pada sore hari. Selisih konsentrasi CO₂ antara udara dan tanah (ΔCO₂) paling besar terjadi pada pagi hari (417 ppm) dan menurun drastis pada sore hari (45 ppm). Hal ini mengindikasikan bahwa proses fotosintesis tanaman paling aktif terjadi pada siang hingga sore hari, sehingga semakin banyak CO₂ yang diserap dari udara ke dalam tanaman dan tanah. Penurunan selisih CO₂ pada sore hari menunjukkan bahwa tanaman telah menyerap sebagian besar CO₂ yang tersedia di udara selama periode siang hari.

$$\text{Fluks CO}_2 \text{ (mg/m}^2\text{/jam)} \approx \Delta\text{CO}_2 \times \text{Konversi ke massa} \times \text{Volume udara yang diserap} / \text{waktu}$$

Tabel 5. Estimasi Serapan CO₂

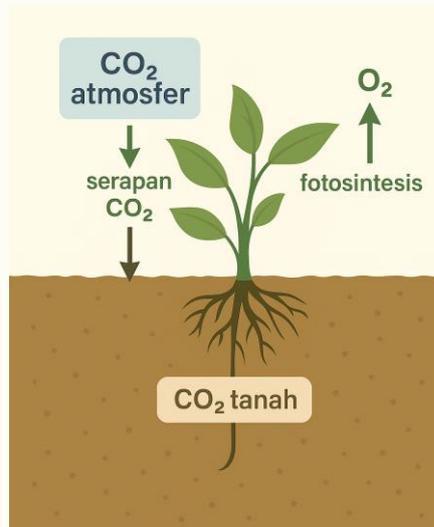
Waktu	ΔCO ₂ (ppm)	Estimasi Serapan CO ₂ (mg/m ² /jam)
Pagi, 08:00 – 09:00	417	817.3
Siang, 12:00 – 13:00	398	780.1
Sore, 16:00 – 17:00	45	88.2

Pada Tabel 5, dapat dilihat nilai estimasi serapan karbon dioksida pada blok waktu tertentu. Data estimasi ini diperjelas dengan visualisasi pada Gambar 7.



Gambar 8. Estimasi Serapan CO₂ pada Tiga Waktu Berbeda

Grafik pada Gambar 8 menampilkan dinamika kadar CO_2 di udara dan dalam tanah menunjukkan pola yang konsisten sepanjang hari. Pada pagi dan siang hari, konsentrasi CO_2 di udara tercatat jauh lebih tinggi dibandingkan dengan di dalam tanah. Perbedaan ini mengindikasikan adanya aktivitas penyerapan CO_2 oleh tanaman melalui proses fotosintesis. Namun, pada sore hari, selisih konsentrasi antara udara dan tanah menurun secara drastis. Hal ini menunjukkan bahwa laju fotosintesis tanaman mulai melemah seiring penurunan intensitas cahaya, sementara tanah tetap melepaskan CO_2 melalui proses respirasi mikroba dan dekomposisi organik. Berdasarkan grafik batang estimasi serapan CO_2 , terlihat bahwa serapan tertinggi terjadi pada pagi hari, yakni sekitar $817 \text{ mg/m}^2/\text{jam}$. Nilai ini sedikit menurun pada siang hari, dan mencapai titik terendah pada sore hari. Pola ini sejalan dengan variasi harian intensitas cahaya dan aktivitas fisiologis tanaman, di mana fotosintesis berlangsung paling optimal pada pagi hingga siang hari dan mulai menurun menjelang sore.



Gambar 9. Proses Serapan CO_2 pada Pertanian Urban

Gambar 9 adalah visualisasi dari proses siklus CO_2 yang terjadi pada pertanian. CO_2 pada tanah adalah hasil respirasi tanaman, CO_2 udara tidak langsung turun dan mengendap ke dalam tanah.

KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa sistem pemantauan serapan karbon berbasis *Internet of Things* (IoT) berhasil dirancang dan diimplementasikan secara efektif pada satu titik lahan pertanian urban di Kota Depok. Dengan memanfaatkan sensor MQ-135, DHT22, YL-69, dan mikrokontroler ESP32, sistem ini mampu mengukur selisih konsentrasi CO_2 antara udara dan tanah secara otomatis dan langsung, sehingga memberikan estimasi serapan karbon secara tidak langsung. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa waktu merupakan faktor signifikan yang memengaruhi dinamika CO_2 , dengan selisih terendah terjadi pada sore hari sebagai indikasi meningkatnya aktivitas fotosintesis. Sistem ini terbukti andal untuk mendukung pemantauan karbon berkelanjutan dan berpotensi dikembangkan lebih lanjut melalui penggunaan sensor CO_2 yang lebih spesifik serta pengujian dalam rentang waktu dan lokasi yang lebih luas guna mendukung strategi mitigasi perubahan iklim di kawasan urban.

DAFTAR PUSTAKA

- Amane, A. P. O., Febriana, R. W., Artiyasa, M., Cahyarningrum, A. O., Husain, H., Abror, M. N., Fachruzzaki, F., Asman, N. A., Ridwan, A., Suraji, A. J., Aritonang, L., & Srifitriani, A. (2023). *Pemanfaatan dan penerapan Internet of Things (IoT) di berbagai bidang: Studi kasus & implementasi pemanfaatan serta penerapan IoT dalam berbagai bidang*. PT Sonpedia Publishing Indonesia.
- Andriani, S., & Prasetyo, B. (2023). Implementasi sistem telekomunikasi berbasis Internet of Things di sektor kesehatan pada area LoS and NLoS. *Decode: Jurnal Pendidikan Teknologi Informasi*, 4(2), 100–110. <https://doi.org/10.51454/decode.v5i1.1093>
- Gamboa, V. S., Kinast, É. J., & Pires, M. (2023). System for performance evaluation and calibration of low-cost gas sensors applied to air quality monitoring. *Atmospheric Pollution Research*, 14(2), 101645. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101645>
- Guan, H. (2024). Construction of urban low-carbon development and sustainable evaluation system based on the internet of things. *Heliyon*, 10(3), e20654. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30533>
- Hosseini, S., Abbasi, A., Magalhaes, L. G., Fonseca, J. C., da Costa, N. M. C., Moreira, A. H. J., & Borges, J. (2024). Immersive interaction in digital factory: Metaverse in manufacturing. *Procedia Computer Science*, 232, 2310–2320. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.02.050>
- Kurniawan, D., Sulistiyanti, S. R., & Murdika, U. (2021). Sistem pemantau kandungan gas karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO₂) menggunakan sensor MQ-7 dan MQ-135 terintegrasi dengan Telegram. *JITET (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan)*, 6(2), 156–166. <https://doi.org/10.23960/jitet.v11i2.2963>
- Mardiana, A., Tarsono, A., Wahono, S. S., & Sujadi, H. (2024). Alat pencatat cuaca untuk meningkatkan kualitas dan efisiensi di perkebunan mangga di Majalengka. *DECODE: Jurnal Pendidikan Teknologi Informasi*, 4(2). <https://doi.org/10.51454/decode.v4i2.596>
- Morchid, A., El Alami, R., Raezah, A. A., & Sabbar, Y. (2023). Applications of internet of things (IoT) and sensors technology to increase food security and agricultural sustainability: Benefits and challenges. *Journal of Integrative Agriculture*, 22(3), 642–653. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2023.03.007>
- Naufal, S. F. (2024). *Sistem monitoring emisi karbon berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan sensor gas MQ-135 (Laporan Proyek Akhir, Politeknik Caltex Riau)*. Politeknik Caltex Riau.
- Nikolic, M. V., Milovanovic, V., Vasiljevic, Z. Z., & Stamenkovic, Z. (2020). Semiconductor gas sensors: Materials, technology, design, and application. *Sensors*, 20(22), 6694. <https://doi.org/10.3390/s20226694>
- Nugraha, R. F., Husna, F. N., Sandi, S., Syahla, A. F., Saputra, Y. A., & Hidayat, R. (2024). Smart air quality guardian: Pengawasan polusi udara berbasis ESP32 dengan sensor gas MQ-2 dan MQ-135. *Jurnal Komputer dan Elektro Sains*, 2(2), 1–7. <https://doi.org/10.58291/komets.v2i2.175>
- Raj, P., & Raman, A. C. (2017). *The Internet of Things*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315273095>

- Refalista, A., Irawati, R., Irawan, I., & Wisjhnuadji, T. W. (2023). Penggunaan sensor MQ-2,4,7,135 dan ESP32 untuk air pollution monitoring berbasis Internet of Things. *Jurnal Ticom: Technology of Information and Communication*, 12(1), 31–36. <https://doi.org/10.70309/ticom.v12i1.104>
- Sari, E. Y., Rahmawati, T., Septianto, Y. W., & Maharani, R. P. (2024). Development of an automatic detection system for environmental feasibility of artificial microgreen planting based on IoT sensors. *Science Tech: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*, 10(2), 119–127. <https://doi.org/10.30738/st.vol10.no2.a17553>
- Sarkar, A., Ghosh, D., Ganguly, K., Ghosh, S., & Saha, S. (2023). Exploring IoT for real-time CO₂ monitoring and analysis. *arXiv preprint arXiv:2308.03780*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.03780>
- Sitanggang, D., Sitompul, C. S., Suyanto, J. H., Kumar, S., & Indra, E. (2022). Analysis of air quality measuring device using Internet of Things-based MQ-135 sensor. *Sinkron: Jurnal dan Penelitian Teknik Informatika*, 6(3), 1078–1084. <https://doi.org/10.33395/sinkron.v7i3.11618>
- Suhendar, H., Indrasari, W., Ghina Muqita, S., & Isnaini, I. G. A. (2024). Development of a Real-Time Gas Concentration Measurement System Using Internet of Things-Based Monitoring. *Spektra: Jurnal Fisika Dan Aplikasinya*, 9(1), 27–38. <https://doi.org/10.21009/SPEKTRA.091.03>
- Suningrat, R. F., Calvinus, Y., & Fat, J. (2022). Pengukuran kualitas udara menggunakan sensor MQ-135 dan DHT 11. *INTRO: Journal Informatika dan Teknik Elektro*, 3(2), 45–52. <https://doi.org/10.51747/intro.v3i2.2033>
- Taufiq, A. J., Hayat, L., Muchtasjar, B., Iskahar, I., Romandolo, D. G., & Amarudin, R. B. (2024). Sistem monitoring polusi udara berbasis sensor MQ-135 untuk deteksi gas CO₂ dan CO: Studi kasus di lingkungan perkotaan. *Techno*, 25(2), 131–138. <https://doi.org/10.30595/techno.v25i2.24100>