

Analisis Efektivitas Fitoremediasi Berbasis Tanaman Hias pada Konsentrasi Formaldehida Dalam Ruangan untuk Meningkatkan *Health and Safety* Pekerja

Bilqis Hanifah Inas¹, Ratna Sari Dewi^{1*}

¹Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Jl Raya ITS Sukolilo Surabaya 60111

*E-mail Korespondensi : ratna.sari.dewi@its.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v18i2.31243>

Submitted June 9th 2025, Accepted July 29th 2025, Published August 10th 2025

Abstrak

Kualitas udara dalam ruangan merupakan faktor krusial yang berdampak langsung pada keselamatan dan kesehatan pekerja (K3), di mana paparan polutan berbahaya seperti formaldehida dapat memicu iritasi, gangguan pernapasan, hingga risiko kesehatan jangka panjang. Berangkat dari isu tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara mendalam efektivitas strategi fitoremediasi menggunakan tanaman hias dalam menurunkan konsentrasi formaldehida di dalam lingkungan ruang kerja kantor. Untuk mencapai tujuan ini, simulasi canggih dilakukan dengan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) melalui platform SimScale. Empat skenario intervensi utama dimodelkan secara detail: (1) kondisi kontrol tanpa intervensi, (2) penggunaan ventilasi mekanis saja, (3) intervensi tanaman hias saja, dan (4) kombinasi sinergis antara ventilasi dan tanaman. Dalam simulasi ini, emisi formaldehida diasumsikan berasal dari material meja kerja, sementara tanaman hias jenis *Ficus benjamina* berperan sebagai agen penyerap pasif. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kombinasi ventilasi dan tanaman merupakan strategi paling superior, mampu menurunkan konsentrasi formaldehida secara drastis hingga 99,8% hanya dalam satu jam. Sementara itu, intervensi tanaman saja juga memberikan kontribusi signifikan dengan penurunan sebesar 46%. Analisis statistik lanjutan menggunakan regresi linear berganda dan ANOVA mengonfirmasi bahwa semua intervensi berpengaruh sangat signifikan ($p < 0,05$). Selain itu, terungkap bahwa penempatan tanaman memengaruhi efektivitas penyerapan, di mana posisi yang lebih dekat ke sumber emisi menunjukkan daya serap lebih baik. Temuan ini menekankan pentingnya strategi integratif antara penataan tanaman dan rekayasa ventilasi untuk menciptakan lingkungan kerja yang sehat, aman, dan produktif.

Kata Kunci: fitoremediasi, formaldehida, CFD, ventilasi, keselamatan kesehatan kerja

Abstract

Indoor air quality is a crucial factor that directly impacts worker safety and health (K3), where exposure to hazardous pollutants such as formaldehyde can trigger irritation, respiratory disorders, and long-term health risks. Based on this issue, this study aims to analyze in depth the effectiveness of a phytoremediation strategy using ornamental plants in reducing formaldehyde concentrations in office workspace environments. To achieve this goal, sophisticated simulations were conducted using *Computational Fluid Dynamics* (CFD) methods through the SimScale platform. Four main intervention scenarios were modeled in detail: (1) a control condition with no intervention, (2) the use of mechanical ventilation alone, (3) ornamental plant intervention alone, and (4) a synergistic combination of ventilation and plants. In this simulation, formaldehyde emissions were assumed to originate from the work desk material, while the ornamental plant *Ficus benjamina* acted as a passive absorbing agent. The simulation results showed that the combination of ventilation and plants was the most superior strategy, capable of drastically reducing formaldehyde concentrations by up to 99.8% in just one hour. Meanwhile, plant intervention alone also made a significant contribution with a reduction of 46%. Further statistical analysis using multiple linear regression and ANOVA confirmed that all interventions had highly significant effects ($p < 0.05$). Furthermore, it was revealed that plant placement influenced absorption effectiveness, with positions closer to the emission source showing better absorption. These findings emphasize the importance of an integrated strategy between plant arrangement and ventilation engineering to create a healthy, safe, and productive work environment.

Key words: : phytoremediation, formaldehyde, CFD, ventilation, occupational safety and health

PENDAHULUAN

Udara dapat dikategorikan menjadi dua jenis utama, yaitu udara di lingkungan luar (*outdoor air*) dan udara di dalam bangunan (*indoor air*). Hampir 90% aktivitas manusia dilakukan di dalam ruangan, sehingga kualitas udara dalam ruangan sangat berdampak pada kesehatan manusia (Kaushik *et al.*, 2023). Menurut *International Institute of Occupational Safety and Health* (NIOSH) pada tahun 1997 yang dikutip oleh Departemen Kesehatan RI (2005), masalah kualitas udara dalam ruangan umumnya disebabkan oleh kurangnya sirkulasi udara (52%), keberadaan sumber polutan di dalam ruangan (16%), polutan yang berasal

dari luar ruangan (10%), mikroorganisme (5%), bahan bangunan (4%), dan faktor-faktor lainnya (13%). Perkantoran menjadi salah satu tempat yang memerlukan pengendalian kualitas udara, karena sebagian besar masyarakat bekerja di sana dan membutuhkan lingkungan yang nyaman (Sahri & Hutapea, 2019). Banyaknya aktivitas di dalam gedung berpengaruh pada meningkatnya jumlah polutan di dalam ruangan (Kumar *et al.*, 2023).

Formaldehida termasuk dalam kelompok senyawa organik volatil (VOC) yang dapat menguap pada suhu kamar dan mencemari udara. Senyawa ini dapat berasal dari berbagai sumber di lingkungan dalam ruangan, termasuk asap rokok, asap masakan, lilin, perabotan, bahan konstruksi, peralatan elektronik, produk pembersih, alat tulis, perekat, dan produk berbahan kayu lapis. Paparan formaldehida dapat memicu berbagai masalah kesehatan, termasuk alergi, iritasi saluran pernapasan, serta iritasi pada mata dan hidung. Senyawa ini masuk ke dalam tubuh melalui pernapasan dan mengganggu fungsi paru-paru (Aripatama, 2021).

Desain ruang kerja yang tidak ergonomis dapat membahayakan keselamatan dan kesehatan para pekerja. Oleh karena itu, perancangan ruang kerja harus memperhatikan prinsip ergonomi, termasuk penggunaan pencahayaan alami maupun buatan yang sesuai standar, serta memastikan adanya sirkulasi udara yang baik. Selain itu, keberadaan jendela juga berperan penting sebagai elemen pendukung ventilasi udara dalam ruangan (Firman, 2022). Sistem HVAC (*Heating, Ventilation, and Air Conditioning*) merupakan salah satu penyumbang utama konsumsi energi di bangunan modern. Di wilayah beriklim tropis, sistem ini bahkan dapat menyerap lebih dari 50% dari total penggunaan energi bangunan (Rifai ans Sasmita, 2023). Tingginya konsumsi energi ini tidak hanya meningkatkan biaya operasional, tetapi juga berdampak pada peningkatan emisi gas rumah kaca. Kondisi ini mendorong banyak peneliti untuk mengeksplorasi berbagai parameter yang dapat mengurangi penggunaan energi, sekaligus mengembangkan solusi berkelanjutan untuk sistem HVAC dan pendekatan alternatif lainnya (Che *et al.*, 2019).

Tanaman hias merupakan salah satu solusi alami dan efisien untuk meningkatkan kualitas udara dalam ruangan. Tanaman ini mampu menyerap polutan, meningkatkan kadar oksigen, serta menjaga kelembaban melalui berbagai proses biologis. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Talaie (2024), *Chlorophytum comosum* dapat menghilangkan sekitar 90% formaldehida di udara. Tingkat efektivitas tanaman sangat bervariasi antar spesies dan dipengaruhi oleh karakteristik molekuler masing-masing polutan (Talaie & Ponraj, 2024). Tanaman dapat menghilangkan dan mengubah zat berbahaya menjadi sumber karbon bagi pertumbuhannya dan mikroorganisme merupakan salah satu manfaat potensial dari fitoremediasi (Sharma *et al.*, 2022). Proses penghilangan senyawa VOC seperti formaldehida biasanya terjadi melalui penyerapan oleh tanaman yang umumnya berlangsung melalui stomata dan lapisan kutikula pada permukaan daun (Ravindra & Mor, 2022).

Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah ilmu yang dimanfaatkan untuk memodelkan dan memperkirakan perilaku aliran fluida, perpindahan massa dan panas, serta berbagai fenomena fisik lainnya. Metode ini digunakan untuk memperoleh gambaran mengenai aliran udara, penyebaran polutan, serta pola penyerapan di dalam ruang tertutup (Susanto *et al.*, 2021). Oleh karena itu, penting dilakukan penelitian yang menganalisis pola aliran udara dengan mempertimbangkan penambahan ventilasi mekanis serta variasi jumlah tanaman hias. Dalam pelaksanaan simulasi, ada tiga tahapan utama yang harus dilakukan, yaitu 1) *Pre-processing*, 2) *Solver (processor)*, dan 3) *Post-processing*. Simulasi ini dilakukan menggunakan *SimScale*, yaitu platform simulasi teknik berbasis web yang memungkinkan pengguna menjalankan pemodelan dan simulasi secara online. Salah satu keunggulan utamanya adalah kemampuannya untuk menjalankan simulasi berbasis CFD (Susanto *et al.*, 2021).

Meskipun penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa tanaman efektif dalam meningkatkan kualitas udara dalam ruangan, masih terdapat kesenjangan penelitian terkait efektivitas fitoremediasi dalam berbagai kondisi lingkungan kerja, dampak jangka panjang dari penggunaan tanaman hijau di lingkungan perkantoran, serta optimalisasi strategi dalam cakupan yang lebih luas. Oleh karena itu, penelitian ini diperlukan untuk menganalisis secara komprehensif efek sinergis antara fitoremediasi tanaman hias dan sistem ventilasi mekanis untuk merumuskan strategi optimal dalam meningkatkan kualitas udara dalam ruangan dan mendukung kesehatan serta produktivitas pekerja.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental berbasis simulasi numerik untuk menganalisis distribusi formaldehida di dalam ruang kerja perkantoran. Geometri ruangan dimodelkan menyerupai ruang kantor tertutup berdimensi 6 m x 4 m x 3 m, dengan meja berbentuk balok sederhana yang diletakkan di pinggir ruangan sebagai sumber emisi formaldehida. Emisi dimodelkan menggunakan *passive scalar* untuk merepresentasikan pergerakan dan penyebaran polutan gas. Untuk memastikan bahwa massa udara (fluida) dalam simulasi selalu terjaga (konservatif), dapat menggunakan persamaan seperti persamaan kontinuitas (Widiarta *et al.*, 2022).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \dots \dots \dots (1)$$

Dimana ρ adalah densitas fluida (kg/m^3), t adalah waktu (s), u adalah vektor kecepatan (m/s), dan ∇ adalah diferensial vektor.

Sedangkan persamaan yang digunakan untuk mengatur pergerakan dan distribusi kecepatan udara di dalam ruang, yang membawa dan menyebarkan formaldehida dari sumbernya ke seluruh ruangan adalah persamaan Navier-Stokes (Widiarta *et al.*, 2022):

Kearah x:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u u) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \nabla(\mu \text{grad } u) + S_{mx} \dots \dots \dots (2)$$

Kearah y:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho u v) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \nabla(\mu \text{grad } v) + S_{my} \dots \dots \dots (3)$$

Kearah z:

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla(\rho u w) = - \frac{\partial P}{\partial z} + \nabla(\mu \text{grad } w) + S_{mz} \dots \dots \dots (4)$$

Pada persamaan-persamaan diatas ρ adalah densitas fluida (kg/m^3), t adalah waktu (s), u adalah vektor kecepatan (m/s), P adalah tekanan statis (Pa), μ adalah viskositas dinamik fluida (Pa.s), S_{mxyz} adalah sumber momentum eksternal pada arah-xyz (N/m^3), ∇ adalah operator del, dan xyz adalah koordinat spasial pada arah tertentu.

Sedangkan, model turbulensi yang digunakan adalah k-epsilon. Model ini adalah standar untuk mensimulasikan efek turbulensi secara akurat. Dimana model energi turbulen (K) yaitu (Widiarta *et al.*, 2022):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} - \rho \epsilon \dots \dots \dots (5)$$

Dimana k adalah energi kinetik turbulen (m^2/s^2), ϵ adalah laju disipasi energi kinetik turbulen (m^2/s^3), ρ adalah massa jenis fluida (kg/m^3), t adalah waktu (s), u_i adalah komponen kecepatan rata-rata pada arah i , x_i, x_j adalah koordinat spasial, μ adalah viskositas molekuler/dinamik fluida (Pa.s), μ_t adalah viskositas turbulen atau "viskositas eddy" (Pa.s), σ_k adalah bilangan Prandtl turbulen untuk k , dan G_k adalah term produksi energi kinetik turbulen.

Kemudian, untuk menghitung bagaimana konsentrasi formaldehida berubah karena terbawa aliran udara (adveksi) dan menyebar karena difusi digunakan persamaan Transport-Spesies (Widiarta *et al.*, 2022):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (uC) = \nabla \cdot (D \nabla C) + S_C \dots \dots \dots (6)$$

Dimana C adalah konsentrasi formaldehida (mg/m^3), u adalah vektor kecepatan udara (m/s), D adalah koefisien difusi formaldehida di udara, dan S_C adalah sumber atau serapan formaldehida (*source/sink*).

Ventilasi alami dimodelkan sebagai lubang persegi panjang pada dinding kiri, kanan, dan langit-langit ruangan. Masing-masing berukuran 0,5 m x 0,3 m, dan untuk *inlet* dipasang pada ketinggian 2,2 m dari lantai, sedangkan tanaman hias berbentuk silinder tegak berdiameter 0,3 m dan tinggi 0,8 m sesuai dengan dimensi umum tanaman *Ficus benjamina* berukuran sedang. Tanaman berjumlah 2 buah dan masing-masing diletakkan terpisah, di ujung ruangan dekat dengan meja dan agak jauh dari meja, yang diasumsikan memiliki kemampuan menyerap formaldehida. Adapun skenario yang diterapkan pada simulasi ditunjukkan pada Tabel 1. Sedangkan pemodelan CFD dilakukan menggunakan *solver*

Incompressible steady-state (laminar flow) dengan model *passive scalar transport*, dengan kondisi batasan (*boundary condition*) seperti pada Tabel 2.

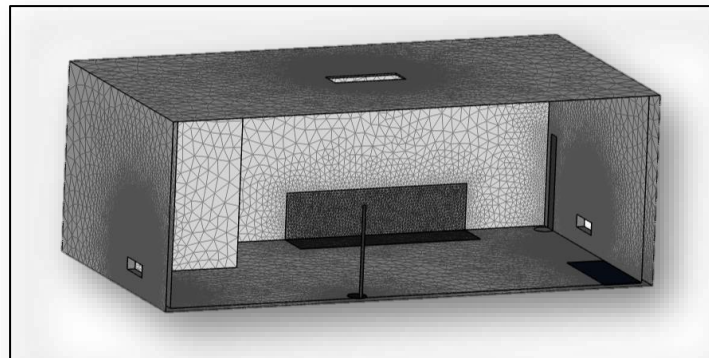
Tabel 1. Skenario Intervensi

Skenario	Intervensi
0	Tanpa intervensi (<i>baseline</i>)
1	Intervensi berupa ventilasi mekanis saja
2	Intervensi berupa tanaman hias saja
3	Intervensi kombinasi (ventilasi + tanaman)

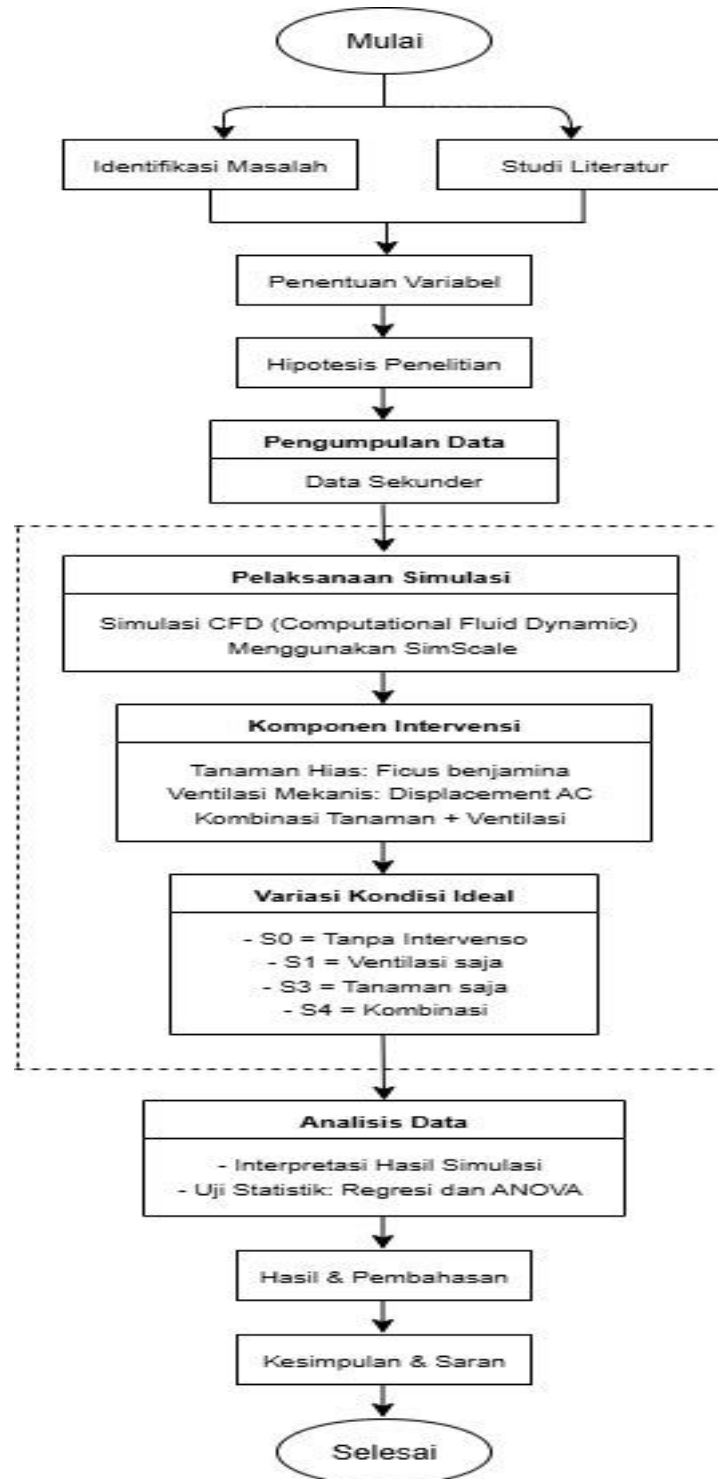
Tabel 2. *Boundary Condition Simulation*

No.	Parameter	Perlakuan
1.	<i>Inlet</i>	Permukaan <i>inlet</i> ditetapkan sebagai <i>fixed velocity inlet</i> dengan kecepatan udara konstan 0,3 m/s mengarah masuk ke dalam ruangan. Parameter ini merepresentasikan udara segar dari <i>AC displacement</i> .
2.	<i>Outlet</i>	Permukaan <i>outlet</i> yang terletak pada bagian plafon sebagai <i>fixed pressure outlet</i> dengan tekanan awal 0 Pa (<i>gauge pressure</i>) yang memungkinkan udara dari dalam ruangan keluar secara pasif.
3.	<i>Wall</i>	Semua permukaan dinding ruangan ditetapkan sebagai <i>no-slip wall</i> tanpa gerakan, dengan model dinding turbulen (<i>turbulent wall function</i>) aktif.
4.	Meja	Permukaan atas meja ditetapkan sebagai <i>passive scalar surface source</i> , dengan nilai <i>fluks scalar</i> +1 untuk menandakan pelepasan formaldehida secara kontinyu.
5.	Tanaman	Permukaan silinder tanaman sebagai pereduksi formaldehida diberi nilai <i>negative passive scalar source (sink)</i> -5, yang mewakili kemampuan tanaman menyerap formaldehida dari udara melalui proses fitoremediasi.
6.	<i>Simulation Control</i>	Untuk setiap skenario waktu simulasi ditetapkan selama 3600 detik (1 jam) dengan <i>write interval</i> 100 yang berarti setiap 100 detik hasil simulasi akan disimpan.
7.	<i>Result Control</i>	<i>Area average</i> diaktifkan untuk merekam konsentrasi formaldehida pada area tertentu, seperti di dekat meja, tanaman, atau ventilasi.

Pembuatan mesh dilakukan secara otomatis di *platform SimScale* menggunakan jenis "*standard automatic meshing*" dengan pengaturan *default*. Mesh ini diterapkan pada seluruh domain geometri yang mencakup ruang kerja, meja, ventilasi, dan tanaman. Pengaturan mesh dalam simulasi dilakukan dengan memperhatikan keseimbangan antara ketelitian hasil dan efisiensi waktu komputasi. Kekasaran mesh pada seluruh dinding ruangan ditetapkan sebesar 0,8 dalam skala 0 hingga 1, yang menunjukkan bahwa mesh cukup halus untuk menangkap variasi aliran secara rinci tanpa memperpanjang durasi simulasi secara signifikan. Selain itu, dilakukan pemadatan mesh (*refinement*) pada area-area tertentu yang dianggap krusial, seperti di sekitar ventilasi (*inlet* dan *outlet*), permukaan meja, serta area tanaman, guna meningkatkan akurasi perhitungan aliran dan distribusi polutan di zona-zona tersebut. Hasil Mesh dapat dilihat pada Gambar 1.

Gambar 1. Mesh Jenis *Standard Automatic*

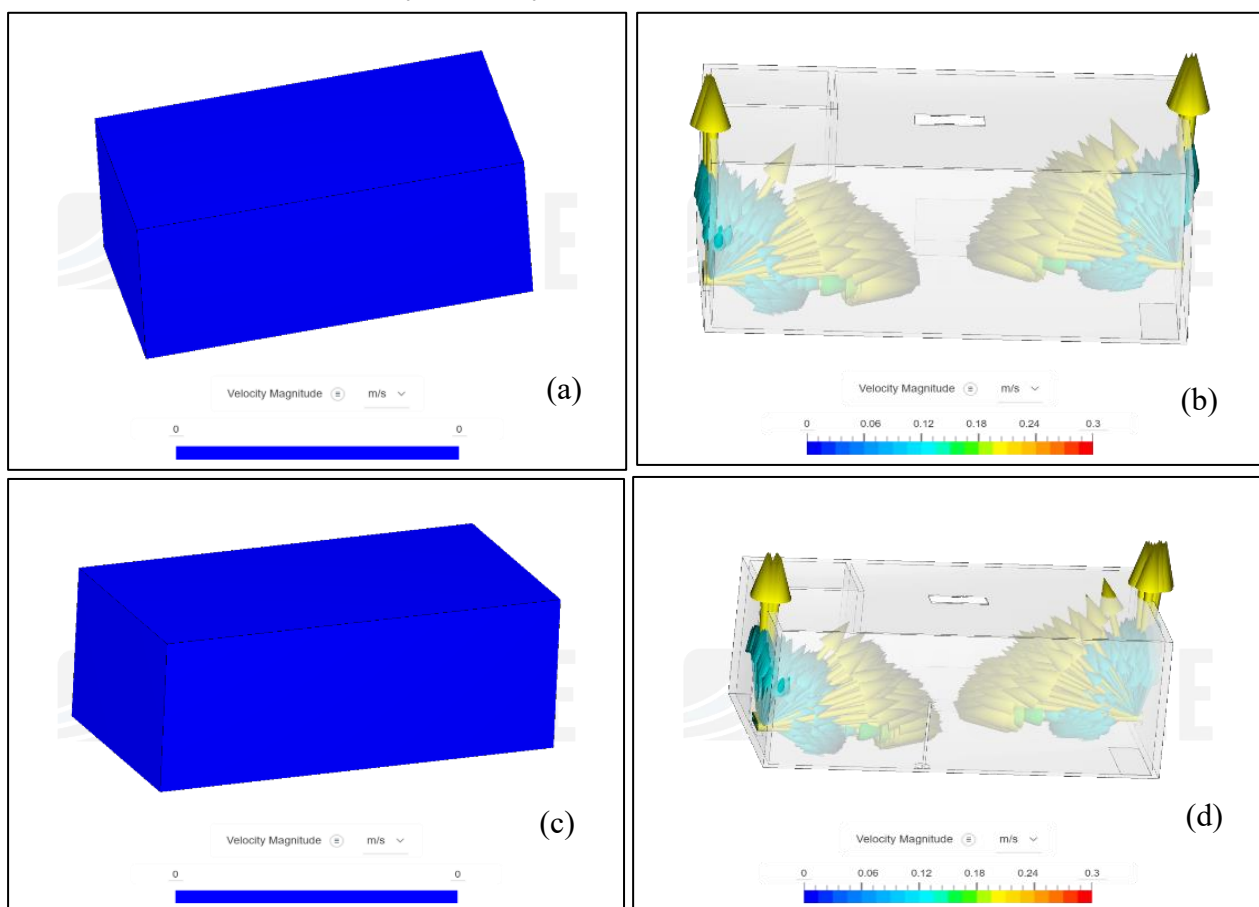
Proses validasi simulasi dilakukan dengan memantau grafik residual untuk setiap variabel utama, seperti komponen kecepatan aliran (U_x , U_y , U_z), tekanan (p), parameter turbulensi (k dan ω), serta konsentrasi formaldehida (T_1). Residual menggambarkan rata-rata kesalahan antara hasil perhitungan numerik pada iterasi berjalan dibandingkan dengan iterasi sebelumnya. Secara umum, simulasi dianggap konvergen dan valid jika nilai residual menunjukkan penurunan secara konsisten hingga mendekati nilai ambang tertentu. Berikut merupakan alur penelitian secara keseluruhan, dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

HASIL PEMBAHASAN

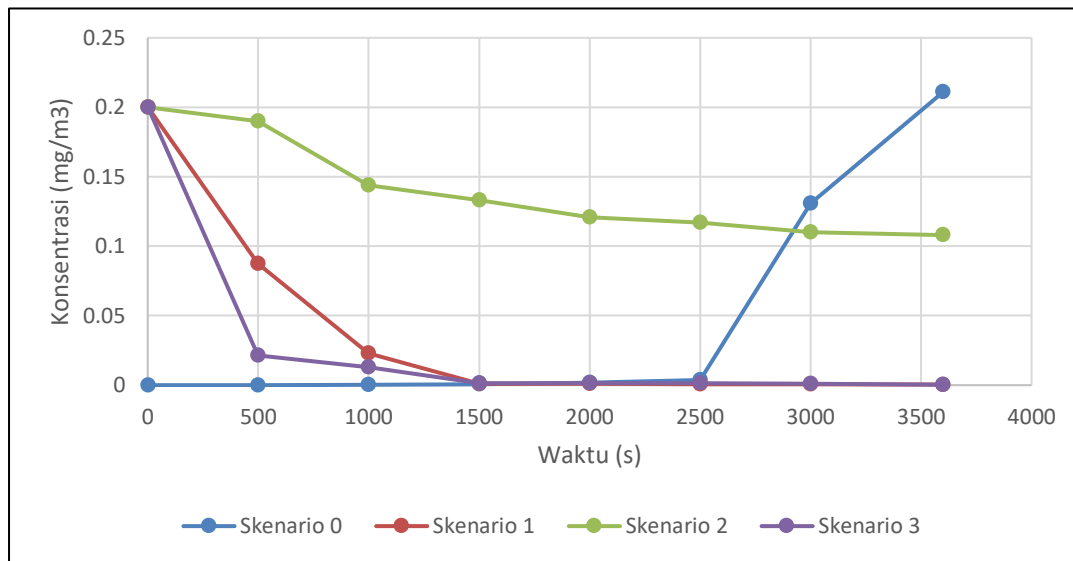
Distribusi aliran udara ditunjukkan melalui vektor aliran, di mana sistem ventilasi *displacement* membentuk pola aliran dari bawah ke atas, memfasilitasi pergerakan polutan ke luar. Pada skenario 0 dan 2 ruangan menunjukkan kondisi aliran udara yang stagnan, ditandai dengan warna biru merata dan ketiadaan arah panah vektor. Meskipun pada skenario 2 terdapat intervensi berupa tanaman, tanaman tidak mampu menciptakan aliran udara sendiri, sehingga sirkulasi tetap minim dan pergerakan polutan tidak efektif, meskipun terjadi penyerapan pasif melalui mekanisme fitoremediasi. Pada skenario 1 dan 3, aliran udara menunjukkan pola yang efektif dalam mendistribusikan dan mengeluarkan polutan dari ruangan. Pada skenario 1, udara mengalir dari inlet bawah menuju outlet atas melalui sistem ventilasi *displacement*, dengan kecepatan maksimum sekitar $\pm 0,3$ m/s, membentuk vektor vertikal yang menandakan sirkulasi yang cukup efisien. Sementara itu, pada skenario 3, pola aliran serupa namun lebih merata dan seimbang di seluruh ruang. Kombinasi ventilasi dengan kehadiran tanaman menciptakan kondisi aliran yang lebih stabil, dengan kecepatan maksimum yang sama ($\pm 0,3$ m/s), namun distribusi udaranya lebih menyebar sehingga meningkatkan efektivitas dalam pengeluaran polutan dan penyegaran udara. Hasil vektor aliran udara dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Vektor Aliran Udara, (a) Skenario 0, (b) Skenario 1, (c) Skenario 2, (d) Skenario 3

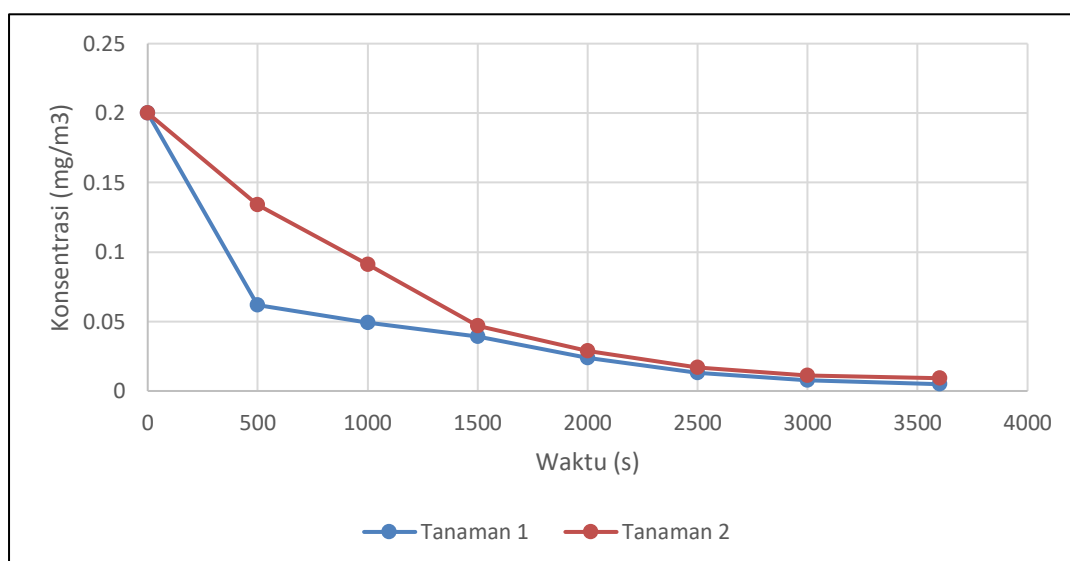
Grafik konsentrasi formaldehida (T1) pada masing-masing skenario menunjukkan perbedaan efektivitas intervensi dalam mereduksi polutan di dalam ruangan. Pada skenario 0, terjadi penurunan awal yang bersifat sementara, namun konsentrasi kembali meningkat hingga mendekati nilai awal ($\pm 0,2$ mg/m³), menunjukkan akumulasi polutan akibat tidak adanya ventilasi atau media penyerap. Skenario 1 memperlihatkan penurunan signifikan sejak awal hingga mendekati nol, mencerminkan bahwa ventilasi *displacement* cukup efektif dalam mendorong keluar polutan dari ruangan. Sementara itu, skenario 2 menunjukkan laju penurunan yang lebih lambat dan bertahap, dengan konsentrasi akhir masih tersisa sekitar 0,11 mg/m³, mengindikasikan bahwa fitoremediasi oleh tanaman memerlukan waktu lebih lama untuk mencapai efektivitas optimal. Adapun skenario 3 menghasilkan penurunan paling cepat dan stabil

sejak awal waktu, dengan konsentrasi mendekati nol dalam waktu singkat. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi ventilasi dan tanaman memberikan hasil paling optimal dalam mereduksi konsentrasi formaldehida di ruang kerja. Gambar keseluruhan perubahan T1 dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Perubahan T1 pada setiap Skenario

Untuk membandingkan daya serap dua tanaman hias, dilakukan analisis konsentrasi formaldehida di dinding terdekat masing-masing tanaman, di mana Tanaman 1 berada lebih dekat (0,5 m) dan Tanaman 2 lebih jauh (± 3 m) dari sumber emisi. Hasilnya diamati melalui grafik T1 di area sekitar kedua dinding tersebut. Grafik perbandingan T1 oleh kedua tanaman dapat dilihat pada Gambar 5.

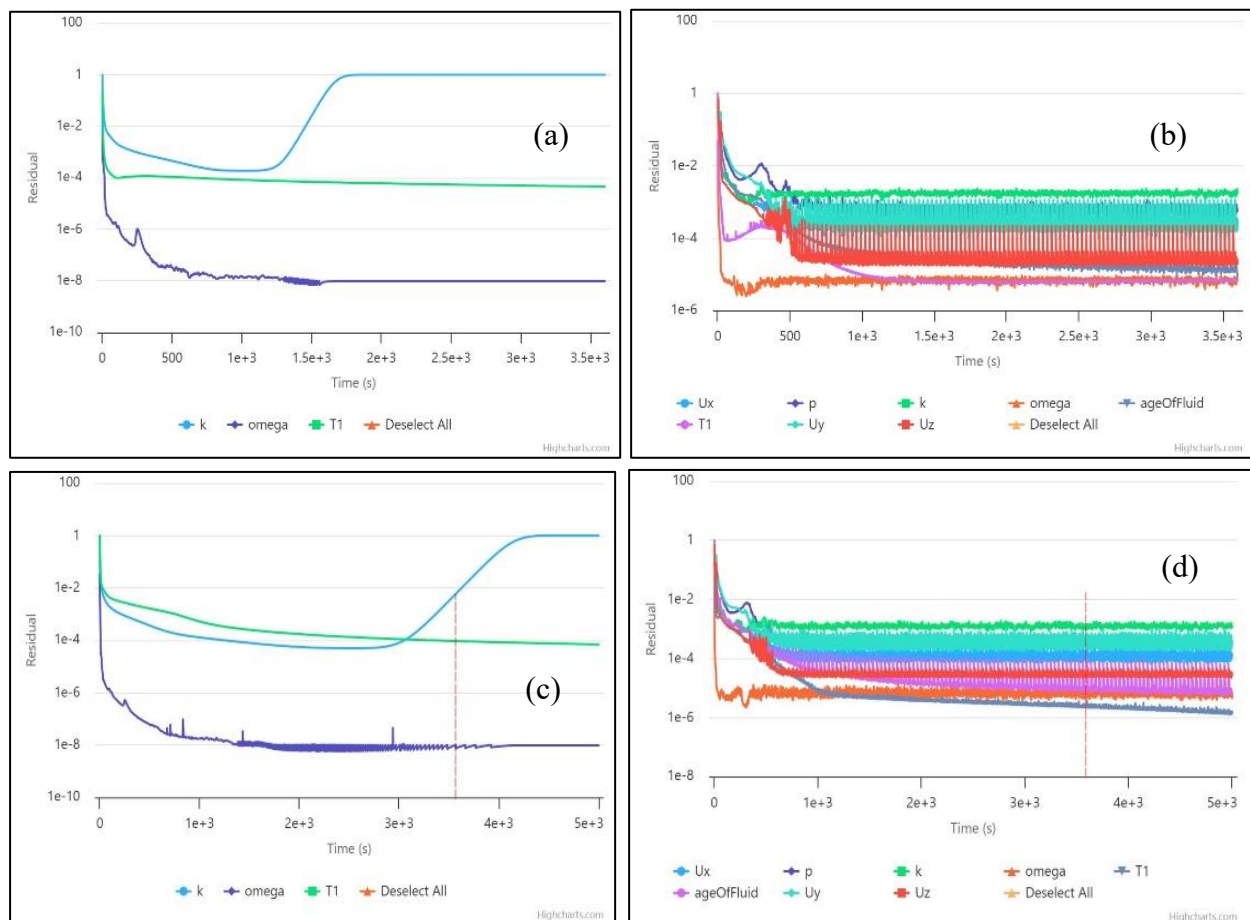


Gambar 5. Perbedaan T1 pada Kedua Tanaman

Grafik menunjukkan perbandingan penurunan konsentrasi formaldehida (T1) antara dua tanaman dengan posisi berbeda terhadap sumber emisi. Tanaman 1 yang berada lebih dekat ke sumber formaldehida ($\pm 0,5$ meter), menunjukkan penurunan konsentrasi yang lebih cepat terutama pada 1000 detik pertama, dibandingkan Tanaman 2 yang berjarak lebih jauh (± 3 meter). Hal ini terlihat dari nilai konsentrasi Tanaman 1 yang lebih rendah hingga menit ke-30. Meskipun pada menit-menit akhir perbedaannya mengecil, secara keseluruhan grafik ini menegaskan bahwa jarak tanaman terhadap sumber emisi memengaruhi efektivitas penyerapan formaldehida. Semakin dekat, semakin cepat penurunannya.

Validasi simulasi dilakukan dengan menganalisis grafik residual dari variabel-variabel utama, seperti komponen kecepatan aliran (U_x , U_y , U_z), tekanan (p), parameter turbulensi (k dan ω), serta konsentrasi formaldehida ($T1$). Residual menunjukkan rata-rata selisih antara hasil perhitungan pada iterasi saat ini dibandingkan dengan iterasi sebelumnya. Secara umum, simulasi dikatakan valid dan konvergen jika nilai residual terus menurun dan mendekati nilai ambang batas yang telah ditentukan.

Hasil validasi simulasi CFD berdasarkan grafik residual menunjukkan bahwa skenario 1 dan 3 memiliki konvergensi paling baik, dengan seluruh variabel utama seperti kecepatan aliran (U_x , U_y , U_z), tekanan (p), turbulensi (k dan ω), serta konsentrasi formaldehida ($T1$) menunjukkan tren penurunan residual yang stabil dan berada di bawah ambang batas $1e-4$. Pada skenario 0 dan 2, meskipun residual $T1$ dan ω menunjukkan konvergensi baik, residual k cenderung meningkat di akhir simulasi, mencerminkan kondisi stagnan akibat tidak adanya ventilasi aktif. Secara keseluruhan, keempat simulasi dapat dianggap valid, namun skenario dengan ventilasi (khususnya skenario 3) menunjukkan kestabilan numerik terbaik. Hasil grafik residual secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 6.

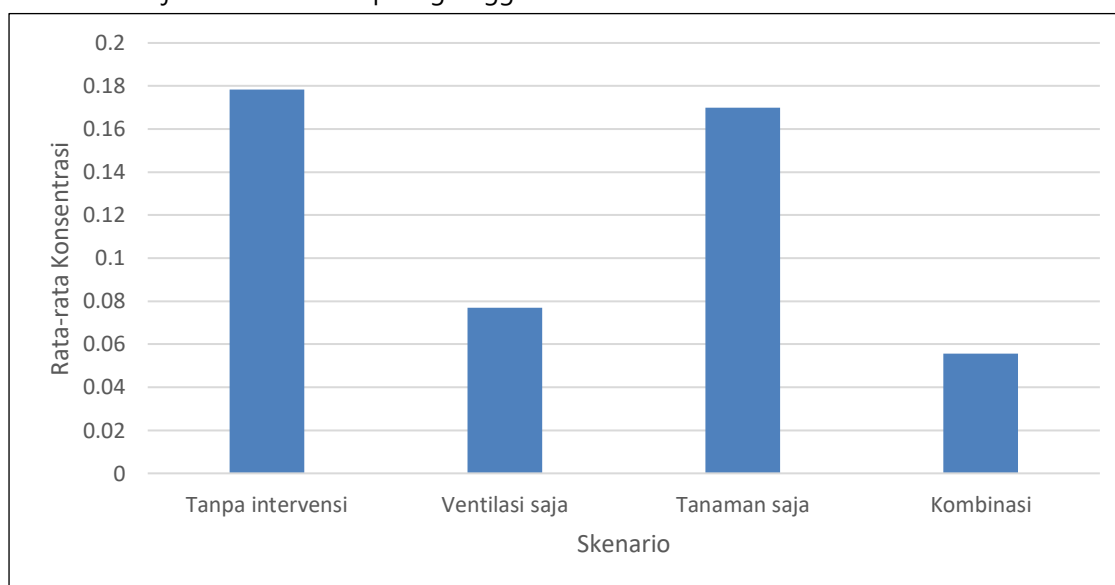


Gambar 6. Grafik Residual. (a) Skenario 0, (b) Skenario 1, (c) Skenario 2, (d) Skenario 3

Selanjutnya, dilakukan uji regresi linear berganda untuk menganalisis pengaruh masing-masing intervensi terhadap penurunan konsentrasi formaldehida, serta uji ANOVA untuk mengidentifikasi perbedaan signifikan antar skenario. Seluruh analisis statistik dilakukan menggunakan Microsoft Excel dengan fitur *Data Analysis Toolpak*. Berdasarkan hasil uji regresi linear berganda, diperoleh model prediktif konsentrasi formaldehida dengan mempertimbangkan waktu dan intervensi venti lasi, tanaman, serta kombinasi keduanya. Persamaan regresi yang terbentuk adalah: $Y = 0,211204 - 0,00000210 \times \text{Waktu} - 0,06360 \times \text{Ventilasi} - 0,04223 \times \text{Tanaman} - 0,15646 \times \text{Kombinasi}$. Y merupakan konsentrasi formaldehida (mg/m^3), dengan ventilasi, tanaman, dan kombinasi sebagai variabel dummy (1 = ada, 0 = tidak ada). Intercept $0,21104 \text{ mg}/\text{m}^3$ merepresentasikan nilai awal konsentrasi tanpa intervensi. Koefisien waktu yang negatif menunjukkan penurunan konsentrasi sebesar $0,00002098 \text{ mg}/\text{m}^3$ per detik. Ventilasi menurunkan

kadar formaldehida sebesar 0,06360 mg/m³, tanaman sebesar 0,04228 mg/m³, dan kombinasi keduanya sebesar 0,15646 mg/m³. Seluruh variabel memiliki p-value < 0,005, yang menunjukkan pengaruhnya signifikan secara statistik.

Hasil uji ANOVA satu faktor menunjukkan adanya empat kelompok perlakuan (tanpa intervensi, ventilasi saja, tanaman saja, dan kombinasi), dengan nilai F hitung sebesar 43,66 yang jauh melebihi F kritis sebesar 2,70. P-value yang sangat kecil (4×10^{-18}) juga berada jauh di bawah ambang signifikansi 0,05, mengindikasikan bahwa perbedaan antar kelompok perlakuan terhadap konsentrasi formaldehida signifikan secara statistik. Rata-rata konsentrasi tertinggi ditemukan pada kelompok tanpa intervensi (0,17825 mg/m³) dengan *Standar Error* (SE) sebesar 0,01275, kemudian tanaman saja (0,1699 mg/m³) dengan *Standar Error* (SE) sebesar 0,00631, lalu disusul ventilasi saja (0,0770 mg/m³) dengan *Standar Error* (SE) sebesar 0,1102, dan paling rendah pada kelompok kombinasi ventilasi dan tanaman (0,0557 mg/m³) dengan *Standar Error* (SE) sebesar 0,0123. Hasil grafik dapat dilihat pada Gambar 7. Temuan ini menegaskan bahwa jenis intervensi yang digunakan berpengaruh nyata terhadap kadar formaldehida, dengan intervensi kombinasi menunjukkan efektivitas paling tinggi.



Gambar 7. Nilai rata-rata Konsentrasi Pada Tiap Skenario

Penelitian ini mengkonfirmasi bahwa keberadaan ventilasi dan tanaman hias secara signifikan berperan dalam menurunkan kadar formaldehida di ruang kerja. Pada skenario tanpa intervensi, konsentrasi formaldehida melebihi ambang batas aman WHO untuk paparan jangka panjang (0,1 mg/m³), sehingga berpotensi menimbulkan dampak kesehatan seperti iritasi saluran pernapasan, mata, serta menurunkan kenyamanan kerja. Sebaliknya, penggunaan ventilasi maupun kombinasi ventilasi dan tanaman mampu menurunkan konsentrasi formaldehida hingga di bawah batas aman tersebut. Temuan ini mendukung studi yang telah dilakukan oleh Sha and Qi (2021) yang menegaskan bahwa ventilasi merupakan solusi efektif dalam meningkatkan kualitas udara di dalam ruangan. Penelitian oleh Liu *et al* (2022) yang berjudul "A review on indoor green plants employed to improve indoor environment" bahwa fitoremediasi dapat menyerap dan menurunkan polutan udara seperti formaldehida, benzena, VOC, CO₂, dan CO. Kondisi ini mendukung upaya peningkatan keselamatan dan kesehatan kerja, karena kualitas udara yang lebih bersih dapat mengurangi risiko gangguan kesehatan, menekan angka ketidakhadiran, serta mendorong produktivitas dan kenyamanan kerja.

Pada skenario dengan intervensi tanaman saja, penurunan konsentrasi formaldehida memang terjadi, namun berlangsung lebih lambat dibandingkan skenario ventilasi atau kombinasi. Dari sudut pandang K3, ini menunjukkan bahwa meskipun tanaman membantu menciptakan udara yang lebih bersih, efektivitasnya belum optimal jika digunakan sebagai satu-satunya intervensi dalam ruang tertutup atau dengan tingkat emisi tinggi. Dalam konteks tersebut, tanaman sebaiknya dijadikan solusi pendukung, bukan utama. Meski begitu, keberadaan tanaman tetap memberikan manfaat tambahan seperti keberlanjutan, estetika, serta

peningkatan kesejahteraan psikologis pekerja. Beberapa studi menyatakan bahwa elemen hijau dalam ruang kerja dapat menurunkan stres, meningkatkan kepuasan, dan memperbaiki suasana hati, menjadikannya komponen penting dalam menciptakan lingkungan kerja yang sehat dan nyaman secara menyeluruh.

KESIMPULAN

Penelitian ini melakukan identifikasi tren tinggi gelombang signifikan musiman di wilayah laut Indonesia menggunakan Data ERA-5 dari ECMWF. Hasil penelitian menunjukkan wilayah perairan Barat Sumatera, Sumatera bagian Selatan dan Papua bagian Utara mengalami tren kenaikan tinggi gelombang secara signifikan disemua musim dengan kenaikan maksimal sebesar 1,39 cm/tahun. Pada perairan Utara Jawa Tengah dan Utara Pulau Masalembu tidak mengalami tren kenaikan tinggi gelombang signifikan untuk semua musim. Pada musim Timur (JJA) dan musim peralihan (SON), wilayah laut Banda dan Papua bagian Selatan mengalami tren kenaikan tinggi gelombang signifikan maksimal sebesar 1,70 cm/tahun. Sedangkan pada wilayah perairan Selatan pulau Lombok, tren kenaikan tinggi gelombang signifikan terjadi pada Musim Barat (DJF) dan Musim Peralihan (MAM) dengan kenaikan maksimal sebesar 1,46 cm/tahun. Kenaikan tinggi gelombang signifikan di wilayah perairan Selatan Pulau Jawa pada musim Barat (DJF) sebesar 1,72 cm/tahun.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, F. (2022). Implementation of occupational safety and health (K3) for increasing employee productivity. *Jurnal Economic Resources*, 5(2).
- Aripratama, K. P. (2021). *Kajian Fitoremediasi Ruangan Dalam (Indoor) dari Paparan Formaldehid dan Partikulat Menggunakan Tanaman Hias dan Pemanfaatan Praktiknya* (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).
- Azzamudin, R., & Marwan Effendy, S. T. (2017). *Analisis Distribusi Aliran Udara Pada Ruangan Dengan Variabel Temperatur dan Penempatan AC Menggunakan Metode Computational Fluid Dynamics (CFD)* (Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Surakarta).
- Bahantwelu, M. (2021). Analisis Pemakaian Displacement AC Dalam Bangunan. *GEWANG: Gerbang Wacana dan Rancang Arsitektur*, 3(2), 38-44.
- Che, W. W., Tso, C. Y., Sun, L., Ip, D. Y., Lee, H., Chao, C. Y., & Lau, A. K. (2019). Energy consumption, indoor thermal comfort and air quality in a commercial office with retrofitted heat, ventilation and air conditioning (HVAC) system. *Energy and Buildings*, 201, 202-215.
- Kaushik, A., Arif, M., Ebohon, O. J., Arsalan, H., Rana, M. Q., & Obi, L. (2023). Effect of indoor environmental quality on visual comfort and productivity in office buildings. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 21(6), 1746-1766.
- Khoshakhlagh, A. H., Mohammadzadeh, M., Ghobakhloo, S., Cheng, H., Gruszecka-Kosowska, A., & Knight, J. (2024). Health risk assessment from inhalation exposure to indoor formaldehyde: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 471, 134307.
- Kumar, R., Verma, V., Thakur, M., Singh, G., & Bhargava, B. (2023). A systematic review on mitigation of common indoor air pollutants using plant-based methods: a phytoremediation approach. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 16(8), 1501-1527.
- Lai, D., Qi, Y., Liu, J., Dai, X., Zhao, L., & Wei, S. (2018). Ventilation behavior in residential buildings with mechanical ventilation systems across different climate zones in China. *Building and Environment*, 143, 679-690.
- Li, W., & Chen, Q. (2021). Design-based natural ventilation cooling potential evaluation for buildings in China. *Journal of Building Engineering*, 41, 102345.

- Liu, C., Miao, X., & Li, J. (2019). Outdoor formaldehyde matters and substantially impacts indoor formaldehyde concentrations. *Building and Environment*, 158, 145-150.
- Ravindra, K., & Mor, S. (2022). Phytoremediation potential of indoor plants in reducing air pollutants. *Frontiers in Sustainable Cities*, 4, 1039710.
- Sahri, M., & Hutapea, O. (2019). Penilaian kualitas udara ruang pada Gedung perkantoran di Kota Surabaya. *Jurnal Higiene Industri dan Kesehatan Kerja*, 4 (1), 1-12.
- Sharma, S., Bakht, A., Jahanzaib, M., Lee, H., & Park, D. (2022). Evaluation of the effectiveness of common indoor plants in improving the indoor air quality of studio apartments. *Atmosphere*, 13(11), 1863.
- Situngkir, D., Rusdy, M. D. R., Ayu, I. M., & Nitami, M. (2021). Sosialisasi Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) sebagai upaya antisipasi kecelakaan kerja dan Penyakit Akibat Kerja (PAK). *Jurnal Pengabdian Kesehatan Masyarakat*, 2(1), 8-17.
- Susanto, A. D., Winardi, W., Hidayat, M., & Wirawan, A. (2021). The use of indoor plant as an alternative strategy to improve indoor air quality in Indonesia. *Reviews on Environmental health*, 36(1), 95-99.
- Talaie, A., & Ponraj, M. (2024). Impact of Houseplants on Reducing Indoor Air Pollution. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 12(3), 1-13.
- Teiri, H., Hajizadeh, Y., & Azhdarpoor, A. (2022). A review of different phytoremediation methods and critical factors for purification of common indoor air pollutants: an approach with sensitive analysis. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 15(3), 373-391.