

Optimalisasi Ventilasi Udara pada Gedung Futsal Komersial di Makassar

Muh. Aryanugraha Ismajaya^{*1}, Raeny Tenriola², Moeh. Kay Muddin Asnur³,
Ahnaf Riyandirga Ariyansyah Putra Helmy⁴
Universitas Negeri Makassar^{1*,2,3,4}
E-mail: ^{1*}muh.aryanugraha.ismajaya@unm.ac.id, ²raeny.tenriola@unm.ac.id,
³moeh.asnur@unm.ac.id, ⁴ahnaf.riyandirga@unm.ac.id

Submitted: 19-02-2025
Revised: 10-06-2025
Accepted: 16-06-2025
Available online: 30-06-2025

How To Cite: Ismajaya, M. A., Tenriola, R., Asnur, M. K. M., & Helmy, A. R. A. P. Performance of Circulation and Air Quality in Commercial Indoor Futsal Facilities in Makassar. *Nature: National Academic Journal of Architecture*, 37–50. <https://doi.org/10.24252/nature.v12i1a3>

Abstrak Kualitas udara dalam ruang olahraga tertutup, seperti lapangan futsal indoor, sangat dipengaruhi oleh sistem sirkulasi udara yang diterapkan. Sirkulasi udara yang baik tidak hanya menunjang kenyamanan termal, tetapi juga berperan penting dalam menjaga kesehatan pengguna ruang. Namun, aspek ini sering kali kurang diperhatikan dalam desain gedung olahraga. Penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis kinerja sirkulasi udara dalam gedung olahraga futsal, (2) mengetahui tingkat kualitas udara di dalam gedung tersebut, dan (3) menghasilkan model desain ventilasi yang mampu mengoptimalkan sirkulasi udara melalui proses simulasi komputasional. Metode yang digunakan adalah survei dan observasi lapangan dengan pengukuran langsung terhadap dimensi bangunan, dimensi bukaan ventilasi, kecepatan dan temperatur udara, serta kadar CO dan CO₂. Simulasi dilakukan dengan menambahkan inlet dan outlet tambahan yang memiliki luasan setara dengan bukaan existing namun diposisikan secara strategis—inlet pada ketinggian 6,70 meter dari lantai dan outlet pada posisi lebih rendah, yakni 1 meter dari permukaan lantai. Hasil simulasi menunjukkan peningkatan kecepatan aliran udara pada bagian tengah bangunan, berkisar antara 0,7 m/s hingga 1,5 m/s. Dengan total luas bukaan inlet 271,32 m² dan outlet 171,6 m², kecepatan aliran udara yang masuk mencapai 2,7 m/s, menghasilkan sirkulasi di dalam ruangan yang lebih merata dan optimal. Temuan ini menunjukkan bahwa penataan ulang ventilasi alami dapat secara signifikan meningkatkan performa sirkulasi udara di dalam gedung olahraga futsal. Model desain yang dihasilkan memberikan kontribusi nyata terhadap praktik perancangan bangunan olahraga yang lebih sehat dan responsif terhadap kebutuhan ventilasi pasif, serta dapat menjadi acuan bagi perancang gedung serupa dalam konteks iklim tropis.

Kata kunci: Ventilasi Alami; Sirkulasi Udara; Kualitas Udara Dalam Ruang; Simulasi Aliran Udara; Gedung Olahraga Tertutup

Abstract Indoor air quality plays a vital role in ensuring comfort and maintaining the health of users in enclosed sports facilities, such as indoor futsal courts. Proper air circulation significantly contributes to thermal comfort and reduces health risks associated with inadequate ventilation. However, this aspect is often neglected in the design of such buildings. This study aims to: (1) analyze the performance of air circulation in indoor futsal buildings, (2) assess indoor air quality, and (3) develop a design model that optimizes airflow using computational simulation. The research methodology included field surveys and direct measurements of building and ventilation opening dimensions, air velocity, temperature, and concentrations of CO and CO₂. Simulations were performed by adding new inlets and outlets equal in area to the existing ones but repositioned strategically—additional inlets were placed at 6.70 meters above the floor, and outlets were located 1 meter above the floor. The third simulation scenario showed a significant improvement in airflow speed at the central part of the building, ranging between 0.7 m/s and 1.5 m/s. By increasing the total inlet area to 271.32 m² and the total outlet area to 171.6 m², with incoming airflow speeds of 2.7 m/s, a more effective and evenly distributed indoor air circulation was achieved. These findings confirm that modifying the placement and sizing of natural ventilation elements can substantially enhance airflow performance in indoor futsal facilities. The proposed design model contributes meaningfully to architectural practices aimed at creating healthier sports facilities that effectively respond to passive ventilation requirements and may serve as a reference for the design of similar buildings in tropical climate regions.

Keywords: Natural Ventilation; Airflow Circulation; Indoor Air Quality; Airflow Simulation; Indoor Sports Facility

PENDAHULUAN

Aktivitas olahraga merupakan salah satu kebutuhan penting dalam kehidupan masyarakat modern dalam menjaga kesehatan fisik dan mental. Olahraga dapat dilakukan secara individu maupun kelompok, baik di luar maupun di dalam ruangan. Dalam konteks urban seperti Kota Makassar, olahraga futsal menjadi salah satu jenis olahraga yang cukup populer, terutama karena dapat dilakukan di dalam ruangan dan tidak terlalu membutuhkan lahan luas. Lapangan futsal sendiri memiliki standar ukuran tertentu, yakni panjang 25–43 meter dan lebar 15–25 meter, serta tidak dilengkapi dengan tembok penghalang. Kondisi ini menjadikan ventilasi dan sirkulasi udara sebagai aspek penting dalam mendukung kenyamanan dan kesehatan pengguna gedung olahraga tersebut.

Kualitas udara dalam ruangan memiliki peran signifikan terhadap kenyamanan dan produktivitas manusia. Ventilasi yang tidak memadai dapat menyebabkan akumulasi karbon dioksida (CO_2) yang tinggi, serta meningkatkan risiko penyebaran penyakit menular, terutama dalam ruang tertutup seperti gedung olahraga (Allen dan Macomber 2020). Studi oleh Y. Guo et al. (2021) menunjukkan bahwa ventilasi yang buruk dalam ruang tertutup berpotensi menyebabkan akumulasi karbon dioksida (CO_2), kelembaban tinggi, serta penyebaran mikroorganisme patogen. Selain itu, penelitian terbaru oleh Hemmati & Shahraki (2025) menekankan bahwa sirkulasi udara yang tidak optimal dapat memperburuk produktivitas dan meningkatkan risiko penyakit pernapasan.

Dalam bangunan olahraga, ventilasi alami maupun mekanis harus dirancang secara tepat untuk menjamin pertukaran udara yang efisien, terutama pada ruang dengan aktivitas fisik tinggi. Meskipun ventilasi alami banyak digunakan pada bangunan olahraga di Indonesia, penerapannya sering kali belum mengikuti standar teknis. Padahal, BSN (2001; 2020) telah memberikan panduan jelas mengenai kebutuhan udara segar dan batas aman konsentrasi polutan di dalam ruang olahraga. Oleh karena itu, perencanaan sistem ventilasi yang baik sangat diperlukan, baik melalui ventilasi alami maupun mekanis, tergantung pada kondisi lingkungan dan desain bangunan (Awbi, 2003).

Sayangnya, isu sirkulasi udara dalam gedung olahraga seperti lapangan futsal sering kali kurang mendapat perhatian. Beberapa studi menunjukkan bahwa konsentrasi CO_2 dalam gedung olahraga dalam ruang dapat melampaui ambang batas 1.000 ppm, terutama pada gedung yang menggunakan sistem ventilasi mekanis tertutup atau tidak memiliki ventilasi silang alami yang memadai (Alves et al., 2013; Seppänen et al., 2005). Padahal, kelembaban dan suhu yang tidak terkontrol dapat berdampak langsung pada kenyamanan termal pengguna ruang (DiNardi, 2003). Menurut Zhao et al. (2020), kelembaban relatif, suhu ruang, serta arah dan kecepatan aliran udara merupakan parameter utama yang menentukan kenyamanan termal di ruang tertutup. Arah bukaan ventilasi, luas bukaan, serta tingkat kebocoran udara turut memengaruhi efektivitas ventilasi. Ketidakteraturan dalam sistem sirkulasi dapat menyebabkan udara tercemar terjebak dalam ruang, serta menurunkan efisiensi energi (Asphaug et al., 2016). Jika ventilasi tidak dirancang dengan baik, kebocoran udara pun bisa terjadi, yang berdampak pada penurunan efisiensi energi dan kualitas udara dalam ruang.

Dengan semakin meningkatnya kompleksitas desain bangunan dan tuntutan efisiensi energi, penggunaan teknologi simulasi menjadi salah satu solusi untuk menganalisis dan mengoptimalkan sistem ventilasi bangunan. *Computational Fluid Dynamics* (CFD) telah digunakan secara luas dalam penelitian desain ventilasi untuk mengevaluasi performa sirkulasi udara di ruang tertutup.

Penelitian oleh Mora-Pérez et al. (2017) menyatakan bahwa simulasi CFD mampu memberikan visualisasi akurat terhadap distribusi aliran udara berdasarkan prinsip konservasi massa, energi, momentum dan temperatur, sehingga sangat membantu dalam proses pengambilan keputusan desain ventilasi. Pendekatan ini terbukti efektif digunakan dalam pengembangan sistem ventilasi pada gedung olahraga skala besar, stasiun, hingga gedung pendidikan.

Untuk memahami dan mengoptimalkan kinerja sirkulasi udara di dalam ruangan, pendekatan berbasis teknologi menjadi semakin penting. Salah satu metode yang relevan adalah simulasi berbasis komputasi atau *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Penelitian Ansari, Rao dan Jain (2023) membuktikan efektivitas simulasi CFD dalam merancang sistem ventilasi yang efisien pada lingkungan ruang tertutup berskala besar seperti stasiun bawah tanah. Dengan demikian, pendekatan ini juga berpotensi diterapkan untuk gedung olahraga *indoor* seperti lapangan futsal.

Namun demikian, kajian mengenai performa sirkulasi udara pada gedung futsal komersial di Indonesia, khususnya di kota-kota beriklim tropis seperti Makassar, masih sangat terbatas. Sebagian besar studi yang ada lebih berfokus pada gedung olahraga berskala besar atau ruang publik lainnya. Padahal, gedung futsal sebagai gedung olahraga yang banyak digunakan masyarakat secara rutin juga menghadapi tantangan kualitas udara yang serupa. Selain itu, belum banyak penelitian yang mengintegrasikan pengukuran lapangan secara langsung dengan simulasi komputasi CFD untuk menghasilkan solusi desain ventilasi yang kontekstual dan aplikatif bagi gedung berskala menengah. Kurangnya kajian ini menunjukkan adanya celah penelitian (*research gap*) yang perlu dijumpai melalui pendekatan berbasis data dan simulasi.

Dengan latar belakang tersebut, tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis kinerja sirkulasi udara dalam gedung olahraga futsal, mengetahui tingkat kualitas udara di dalamnya, serta merancang model desain ventilasi yang optimal melalui simulasi komputasional menggunakan perangkat lunak CFD.

METODE

A. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di lapangan futsal *indoor* Gedung Gelanggang Futsal Telkom yang terletak di kompleks perkantoran PT. TELKOM, Jl. A.P. Pettarani, Makassar. Gedung ini berada di antara sejumlah bangunan dan gedung olahraga lainnya. Bangunan memiliki bentuk memanjang dengan dimensi 81 meter panjang, 23 meter lebar dan ketinggian bervariasi, yaitu 10,24 meter di bagian depan dan 6,4 meter di bagian belakang. Di dalam gedung ini terdapat tiga lapangan futsal yang masing-masing berukuran 25 x 17 meter. Proses pengumpulan data di lapangan dilakukan selama tiga hari.

B. Metode Pengumpulan Data

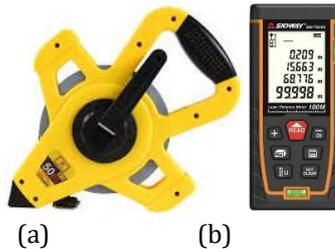
Penelitian dilakukan dengan menggabungkan pengukuran langsung di lapangan dan simulasi komputasional untuk memperoleh gambaran yang lebih menyeluruh. Penelitian ini bersifat kuantitatif dengan pendekatan eksperimen. Tujuannya adalah untuk menganalisis performa sirkulasi udara di dalam gedung futsal dengan mengamati dan memodifikasi variabel ventilasi, menggunakan pengukuran langsung dan simulasi komputasional untuk mengetahui seberapa baik sistem ventilasi alami dalam gedung futsal ini bekerja, terutama dalam menjaga sirkulasi udara dan kenyamanan termal bagi pengguna.

Data dikumpulkan melalui dua metode utama:

1. Observasi dan Pengukuran Langsung

Pengukuran dilakukan secara langsung di lapangan untuk mendapatkan data fisik aktual, seperti:

a. Ukuran dan bentuk bangunan



Gambar 1. (a) pita ukur; (b) laser distance meter

Sumber: *Google Image*

Pengukuran dimensi bangunan (panjang, lebar, tinggi) dilakukan menggunakan pita ukur dan *laser distance meter* untuk membangun model 3D geometri ruang.

(a) Posisi dan dimensi bukaan ventilasi

Setiap bukaan dicatat posisi vertikalnya dari lantai dan luas bukaan dihitung secara manual berdasarkan pengukuran panjang dan lebar bukaan.

(b) Kecepatan aliran udara di beberapa titik



Gambar 2. Anemometer Digital Krisbow Hotwire

Sumber: *Google Image*

Diukur menggunakan anemometer digital Krisbow Hotwire KW0600653 dengan rentang 0,1–25 m/s dan akurasi $\pm 0,1$ m/s, pada titik-titik strategis di dalam dan luar ruang.

(c) Temperatur udara dalam ruangan



Gambar 3. Termometer Onset HOBO UX100-003

Sumber: *Google Image*

Diukur menggunakan termometer Onset HOBO UX100-003, dengan rentang suhu -20 hingga 70 °C dan akurasi $\pm 0,21$ °C, dipasang di empat titik representatif dalam ruangan.

2. Dokumentasi Visual

Untuk mendukung data kuantitatif, dilakukan pula dokumentasi berupa foto, sketsa denah, serta catatan lapangan sebagai referensi tambahan selama proses analisis.

Simulasi dan Analisis

Setelah data lapangan terkumpul, tahap selanjutnya adalah melakukan simulasi aliran udara menggunakan perangkat lunak *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Penelitian oleh Guo et al. (2015) membahas optimalisasi desain ventilasi alami berbasis simulasi CFD untuk bangunan ramah lingkungan. Simulasi dilakukan dengan memanfaatkan data hasil pengukuran sebagai input awal.

Untuk memastikan reliabilitas hasil simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD), dilakukan langkah validasi dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data pengukuran aktual di lapangan. Validasi difokuskan pada dua parameter utama, yaitu temperatur udara dan kecepatan aliran udara yang diukur pada empat titik representatif di dalam ruang gedung futsal, khususnya pada area tengah dan sekitar bukaan ventilasi.

Data temperatur diperoleh dari pengukuran menggunakan termometer digital pada kisaran waktu dan titik yang sama dengan simulasi, sedangkan kecepatan udara diukur menggunakan anemometer digital. Nilai-nilai dari simulasi CFD kemudian dibandingkan secara langsung dengan hasil pengukuran tersebut.

Table 1. Hasil Validasi Data Simulasi dengan Data Pengukuran Langsung di Lapangan

Parameter	Data Lapangan	Hasil Simulasi CFD	Selisih (Error Margin)
Temperatur rata-rata ruang (°C)	32,5–33,6 °C	31,8–32,9 °C	±1,8 °C
Kecepatan udara di titik tengah (m/s)	0,73–1,20 m/s	0,80–1,35 m/s	±0,4 m/s

Sumber: Hasil pengamatan (2024)

Selisih yang terjadi masih berada dalam batas toleransi akseptabel sebagaimana disampaikan oleh Sapian (2009), yang menyatakan bahwa selisih ± 2 °C dan $\pm 0,5$ m/s masih dapat diterima dalam validasi CFD untuk bangunan dengan kondisi alami. Proses validasi ini menunjukkan bahwa model simulasi memiliki akurasi yang cukup baik dan dapat diandalkan untuk memprediksi distribusi aliran udara dan kenyamanan termal dalam gedung futsal. Dengan demikian, hasil simulasi dapat digunakan sebagai dasar pertimbangan dalam pengambilan keputusan desain ventilasi.

Beberapa skenario simulasi dijalankan dengan memodifikasi dimensi dan posisi bukaan ventilasi, agar dapat diketahui konfigurasi yang paling efektif dalam mendistribusikan udara secara merata dan menjaga suhu ruangan tetap nyaman. Data lapangan digunakan sebagai input awal dalam simulasi berbasis *Computational Fluid Dynamics* menggunakan ANSYS Fluent.

Simulasi dilakukan dengan menggunakan hasil pengukuran lapangan sebagai dasar penentuan parameter *boundary condition* dalam perangkat lunak ANSYS Fluent. Beberapa parameter kunci yang dimasukkan ke dalam simulasi antara lain kecepatan udara pada inlet, temperatur udara dalam ruang, serta kondisi fisik lingkungan sekitar (Tabel 2).

Kecepatan udara masuk (inlet) diperoleh melalui pengukuran menggunakan anemometer digital yang ditempatkan pada tiga titik bukaan ventilasi sisi luar gedung, dengan ketinggian $\pm 2,5$ meter dari lantai. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa kecepatan udara yang masuk bervariasi antara 0,73 hingga 2,27 m/s. Nilai maksimum ini digunakan sebagai input kecepatan untuk simulasi pada masing-masing skenario ventilasi.

Temperatur udara dalam ruangan diperoleh dari pengukuran menggunakan termometer digital pada empat titik, mencakup area dekat inlet, area tengah ruang, dan dekat outlet. Suhu rata-rata berkisar antara 31,5–33,6°C selama periode observasi, dengan nilai maksimum mencapai 33,63°C. Nilai-nilai ini digunakan sebagai parameter validasi untuk membandingkan hasil simulasi dengan kondisi aktual di lapangan.

Selain itu, beberapa asumsi juga ditetapkan untuk melengkapi simulasi. Tekanan udara luar diasumsikan 0 Pa sebagai *pressure outlet*, dan suhu udara luar ditetapkan konstan pada 31°C, berdasarkan rerata suhu lingkungan saat pengukuran. Densitas udara dianggap tetap sebesar 1,16 kg/m³ sesuai dengan standar kondisi tropis. Model aliran yang digunakan adalah turbulen dengan pendekatan k-ε (*standard*), dan simulasi dijalankan dalam kondisi *steady-state* untuk memudahkan proses konvergensi.

Table 2. Parameter yang Digunakan dalam Simulasi CFD

Parameter	Nilai / Keterangan
Kecepatan udara masuk (inlet)	0,73 – 2,27 m/s (nilai maksimum digunakan untuk simulasi)
Posisi pengukuran inlet	2,5 m dari lantai (pada bukaan sisi gedung)
Suhu udara dalam ruang	31,5 – 33,6°C (digunakan untuk validasi simulasi)
Suhu udara luar (ambient)	31°C (asumsi konstan)
Densitas udara	1,16 kg/m ³ (standar tropis)
Model turbulensi	k-epsilon (standard)
Tipe simulasi	Steady-state CFD

Sumber: Hasil pengamatan penulis (2024)

Penetapan parameter-parameter ini bertujuan untuk memastikan bahwa simulasi mendekati kondisi nyata di lapangan dan menghasilkan model aliran udara yang dapat diandalkan sebagai dasar pertimbangan desain ulang ventilasi. Adapun skenario yang akan digunakan dalam simulasi mencakup tiga skenario (Tabel 3):

1. Skenario 1: Penambahan outlet setara luasan existing,
2. Skenario 2: Penambahan inlet pada posisi tinggi,
3. Skenario 3: Penambahan inlet (tinggi) dan outlet (rendah) secara simultan.

Table 3. Rangkuman Skenario Simulasi CFD Ventilasi Gedung Futsal

Skenario	Deskripsi	Luas Inlet (m ²)	Luas Outlet (m ²)	Posisi Inlet	Posisi Outlet	Kecepatan Udara Masuk	Distribusi Kecepatan Udara di Tengah	Efektivitas Sirkulasi
Existing	Bukaan asli, tidak dimodifikasi	135,66	85,80	2,5 m dari lantai	4,5 m dari lantai	≤ 1,0 m/s	0,15 – 0,7 m/s	Rendah
Skenario 1	Penambahan outlet seluas inlet di posisi yang sama	135,66	171,60	Sama seperti existing	Sama seperti existing	≤ 1,0 m/s	0,4 – 1,0 m/s	Cukup
Skenario 2	Penambahan inlet baru di posisi lebih tinggi (+6,7 m)	271,32	85,80	Inlet baru di +6,70 m	Sama seperti existing	2,7 m/s	0,5 – 1,2 m/s	Sedang

Skenario	Deskripsi	Luas Inlet (m ²)	Luas Outlet (m ²)	Posisi Inlet	Posisi Outlet	Kecepatan Udara Masuk	Distribusi Kecepatan Udara di Tengah	Efektivitas Sirkulasi
Skenario 3	Kombinasi inlet tinggi dan outlet rendah untuk menciptakan aliran silang	271,32	171,60	Inlet di +6,70 m	Outlet tambahan di +1,0 m	2,7 m/s	0,7 – 1,5 m/s	Tinggi (optimal)

Sumber: Hasil pengamatan (2024)

Dalam studi ini, simulasi dilakukan dengan memanfaatkan data pengukuran lapangan sebagai input awal. Namun, untuk menjamin reliabilitas hasil simulasi, dilakukan pula proses validasi dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data aktual dari pengukuran suhu dan arah aliran udara pada titik-titik tertentu di dalam ruang. Selisih hasil diukur dengan menghitung error margin guna menilai akurasi model simulasi.

1. Setup Simulasi

Simulasi dilakukan menggunakan solver steady-state dengan asumsi kondisi tunak untuk memudahkan proses konvergensi. Model aliran yang digunakan adalah turbulen, menggunakan model k-epsilon, yang umum digunakan dalam studi ventilasi bangunan. Kondisi batas ditetapkan sebagai berikut:

- Inlet: ditetapkan pada bukaan ventilasi dengan debit aliran udara yang diukur di lapangan
- Outlet: didefinisikan sebagai tekanan ambient (0 Pa)
- Dinding: asumsi no-slip dengan suhu konstan sesuai data pengukuran
- Suhu udara luar: diasumsikan konstan berdasarkan rata-rata suhu udara saat pengukuran lapangan (misalnya 31°C)
- Densitas udara: dianggap konstan sesuai standar kondisi tropis (sekitar 1.16 kg/m³)

Kriteria konvergensi ditetapkan dengan batas toleransi 1×10^{-5} untuk residual kecepatan dan energi.

2. Mesh dan Validasi

Model bangunan diformulasikan dalam bentuk tiga dimensi menggunakan mesh unstructured tetrahedral. Untuk memastikan ketelitian numerik, dilakukan pengujian mesh independence dengan tiga variasi jumlah elemen: kasar (250.000), sedang (600.000), dan halus (1.200.000). Hasil simulasi menunjukkan perbedaan kurang dari 2% antara mesh sedang dan halus, sehingga mesh sedang dipilih untuk efisiensi komputasi.

Validasi hasil simulasi dilakukan dengan membandingkan temperatur dan arah aliran udara di empat titik ukur dalam ruangan. Selisih rata-rata antara data simulasi dan pengukuran lapangan berada dalam rentang $\pm 1,8^\circ\text{C}$ dan $\pm 0,4$ m/s, yang masih berada dalam batas toleransi akseptabel (Sopian, 2009).

Table 4. Parameter Simulasi CFD untuk Analisis Ventilasi Gedung Futsal

Kategori	Parameter	Keterangan
Jenis Simulasi	Steady-state	Asumsi aliran tunak
Model Aliran	Turbulen (k-ε standard)	Cocok untuk aliran internal skala ruangan
Medium Fluida	Udara	Densitas: 1,16 kg/m ³ ; Viskositas: $1,85 \times 10^{-5}$ kg/m·s
	Inlet	Debit udara dari data lapangan (misal: 1,2 m ³ /s)

Kategori	Parameter	Keterangan
Kondisi Batas (Boundary Conditions)	Outlet	Tekanan ambien (0 Pa)
	Dinding	No-slip condition; suhu konstan dari pengukuran
	Suhu luar	31 °C (rata-rata saat pengukuran)
Kriteria Konvergensi Grid / Mesh	Residual < 1×10^{-5}	Untuk kecepatan, tekanan, dan energi
	Unstructured tetrahedral Jumlah elemen mesh	Digunakan untuk fleksibilitas geometri kompleks 600.000 elemen (hasil mesh independence test)
Validasi	Titik pengukuran lapangan	4 titik (temperatur dan kecepatan aliran)
	Margin of Error	Suhu: $\pm 1,8$ °C; Kecepatan: $\pm 0,4$ m/s

Sumber: Hasil pengukuran (2024)

3. Teknik Analisis Data

Data yang diperoleh dari pengukuran lapangan dianalisis secara statistik deskriptif untuk mengetahui nilai rata-rata, nilai tertinggi dan nilai terendah dari suhu, kelembaban dan kadar gas. Hasil analisis ini menjadi dasar dalam pemodelan CFD. Selanjutnya, hasil simulasi dievaluasi untuk melihat pengaruh perubahan pada variabel bebas (dimensi dan posisi ventilasi) terhadap variabel terikat (aliran udara dan temperatur ruang). Pendekatan ini sejalan dengan metode eksperimen berbasis simulasi numerik.

Penelitian ini memiliki beberapa batasan yang perlu diperhatikan. Studi ini hanya memfokuskan pada sistem ventilasi alami tanpa mempertimbangkan pengaruh ventilasi mekanis atau sistem HVAC yang mungkin digunakan dalam kondisi nyata. Selain itu, pengukuran kualitas udara terbatas pada parameter suhu, kelembaban, kecepatan udara, serta kadar CO dan CO₂. Senyawa pencemar lain seperti volatile organic compounds (VOC) dan partikel debu halus belum dimasukkan ke dalam analisis. Simulasi CFD yang digunakan juga dijalankan dalam kondisi statis dengan asumsi aliran udara konstan, tanpa memasukkan dinamika perubahan beban aktivitas pengguna, seperti fluktuasi jumlah orang atau intensitas olahraga. Oleh karena itu, hasil simulasi dan rekomendasi desain dalam studi ini sebaiknya dilihat sebagai pendekatan awal yang masih dapat dikembangkan lebih lanjut melalui studi lanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kondisi Termal dan Kelembaban Ruang

Pengukuran suhu dan kelembaban dilakukan selama tiga hari berturut-turut di tiga lapangan futsal. Hasilnya menunjukkan suhu tertinggi mencapai 33,63°C dan kelembaban maksimum 72,95%, yang terjadi pada sore hingga malam hari (Tabel 5). Distribusi suhu relatif merata di seluruh ruangan, dengan variasi suhu hanya 2–3°C sepanjang hari. Kelembaban meningkat seiring waktu penggunaan gedung, menunjukkan akumulasi uap air dari aktivitas olahraga dan kurangnya sirkulasi.

Table 5. Rata-rata temperatur dan kelembaban

JAM	HARI PERTAMA LAPANGAN 2				HARI KEDUA LAPANGAN 3				HARI KETIGA LAPANGAN 1			
	C	D	E	F	C	D	E	F	C	D	E	F
10.00	31.65	31.75	32.20	30.74	31.08	30.39	30.17	30.65	31.29	31.09	30.81	30.86
	47.76	48.15	50.98	51.77	53.23	55.73	56.55	56.05	51.30	52.87	53.70	54.48
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
11.00	32.76	32.72	32.72	31.96	32.53	31.33	31.33	31.54	32.68	32.85	32.85	31.79

	44.65	45.05	47.23	46.87	48.16	52.05	53.20	51.54	45.33	46.05	46.25	48.42
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
12.0	33.15	32.99	31.96	31.92	32.69	31.94	31.57	31.95	32.61	32.82	32.34	31.69
0												
	46.53	47.10	50.02	50.05	48.95	51.67	52.90	51.77	45.18	45.28	47.30	49.08
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
13.0	33.05	33.02	32.15	32.19	32.71	32.02	31.67	31.89	33.19	33.19	32.81	32.22
0												
	47.28	46.93	50.42	50.32	47.65	50.20	50.82	50.37	43.37	44.02	45.28	46.95
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
14.0	32.86	32.83	32.18	32.37	33.22	32.32	32.21	32.47	32.95	33.16	32.87	32.40
0												
	48.85	49.43	51.25	50.77	45.80	48.83	47.95	48.78	46.08	46.52	47.03	48.77
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
15.0	33.00	33.19	32.62	32.82	32.92	32.09	32.30	32.43	33.05	33.18	33.05	32.51
0												
	49.13	50.43	51.97	51.12	48.05	51.00	50.35	49.07	51.37	51.72	51.95	53.93
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
16.0	32.57	32.76	32.45	32.61	33.27	32.58	32.79	32.92	33.63	33.55	33.54	33.08
0												
	51.62	52.88	52.63	52.42	46.75	48.00	48.07	48.30	43.87	42.65	42.87	46.48
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
17.0	31.78	32.30	32.08	32.27	32.55	32.18	32.56	32.46	33.15	33.01	33.04	32.96
0												
	53.88	53.05	53.38	53.12	49.15	50.25	49.05	50.17	47.37	48.77	47.75	48.45
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
18.0	31.40	31.54	31.46	31.60	30.76	31.07	31.52	31.08	28.76	28.61	28.67	29.11
0												
	55.48	55.85	55.85	55.52	55.45	54.95	53.45	55.02	67.27	68.60	64.65	66.27
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
19.0	30.24	30.18	30.48	30.70	30.19	30.53	31.06	30.43	27.99	27.79	28.09	28.50
0												
	59.67	62.45	60.80	60.52	57.76	57.15	54.78	57.60	70.06	69.35	69.97	68.55
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
20.0	29.57	29.54	29.92	30.03	29.60	30.08	30.49	29.91	27.46	27.47	27.52	28.99
0												
	67.65	67.82	64.63	66.13	60.03	61.33	59.37	61.55	68.60	66.27	67.27	66.27
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
21.0	28.95	28.96	29.32	29.53	28.96	29.19	29.91	29.30	27.65	27.55	27.59	28.84
0												
	72.95	72.73	71.32	70.58	63.43	62.05	60.10	64.32	69.35	68.55	70.06	70.17
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
MAX	33.15	33.19	32.72	32.82	33.27	32.58	32.79	32.92	33.63	33.55	33.54	33.08
	72.95	72.73	71.32	70.58	63.43	62.05	60.10	64.32	70.06	69.35	70.06	70.17
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
MIN	28.95	28.96	29.32	29.53	28.96	29.19	29.91	29.30	27.46	27.47	27.52	28.50
	44.65	45.05	47.23	46.87	45.80	48.00	47.95	48.30	43.37	42.65	42.87	46.48
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%

Sumber: Hasil pengukuran (2024)

B. Kecepatan Aliran Udara

Kecepatan udara yang masuk ke dalam gedung bervariasi antara 0,15 m/s hingga 2,27 m/s, dengan mayoritas pengukuran menunjukkan nilai di bawah 1 m/s (Tabel 6). Kecepatan tertinggi cenderung terjadi dekat bukaan dan menurun drastis di area tengah bangunan. Ketidakseimbangan antara luas inlet (135,66 m²) dan outlet (85,8 m²) menghambat sirkulasi udara alami. Fenomena penurunan kecepatan di tengah gedung menyebabkan udara tercemar terjebak di area tersebut.

Table 6. Rata-rata kecepatan aliran udara

JAM	HARI PERTAMA				HARI KEDUA				HARI KETIGA			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
10.00	0.86	1.08	0.95	0.88	0.56	0.85	0.73	0.73	0.56	0.85	0.73	0.73

11.00	30.90	32.23	31.10	31.57	30.77	31.10	31.27	30.63	30.77	30.60	30.60	30.32
	0.45	0.49	0.73	0.76	0.77	0.78	0.48	0.86	0.43	0.36	0.38	0.49
	32.77	32.53	32.20	31.90	30.40	30.63	30.33	29.73	31.60	31.73	31.47	31.23
12.00	0.73	0.74	0.75	0.84	0.61	1.20	0.36	0.95	0.71	0.92	0.78	0.63
	31.57	31.60	31.63	31.87	30.97	31.43	31.17	30.43	30.97	31.13	31.17	30.83
13.00	0.98	1.01	1.34	1.10	0.33	0.60	0.80	0.91	0.55	0.60	0.62	0.61
	31.70	31.57	31.50	31.50	30.80	31.13	31.00	30.40	31.17	31.40	31.33	31.07
14.00	1.08	1.04	1.54	1.07	0.83	0.90	1.25	0.78	0.99	0.52	0.87	1.06
	31.90	31.53	31.17	31.10	31.03	31.23	31.10	30.60	31.87	31.70	31.53	31.33
15.00	0.87	1.03	0.90	1.05	0.60	0.83	0.73	0.89	0.53	0.76	0.48	0.73
	32.03	31.97	31.50	31.33	30.60	30.70	30.60	30.37	31.60	31.53	31.43	31.33
16.00	1.26	0.93	1.13	0.95	0.40	0.49	0.54	0.56	0.38	0.37	0.32	0.54
	31.53	31.50	31.13	31.27	31.52	31.62	31.22	30.87	32.10	32.03	32.07	31.97
17.00	0.86	0.84	1.12	0.72	0.65	0.66	0.49	0.68	1.83	1.53	1.51	2.27
	30.73	30.90	30.87	31.00	30.90	30.27	30.50	30.03	30.23	29.90	29.80	29.53
18.00	0.55	0.66	0.65	0.69	0.58	0.70	0.54	0.62	0.61	0.58	0.84	1.32
	31.07	30.40	30.53	30.10	30.80	30.87	30.73	30.17	28.73	28.37	27.87	27.53
19.00	0.55	0.64	0.84	0.56	0.60	0.59	0.59	0.73	0.58	0.42	0.41	0.40
	30.30	30.63	30.53	30.30	30.57	29.57	30.47	30.13	27.43	27.40	27.30	27.50
20.00	0.43	0.37	0.31	0.36	0.15	0.16	0.23	0.24	0.15	0.16	0.23	0.24
	30.60	30.03	29.50	29.27	28.97	29.00	28.87	28.77	28.97	29.00	28.87	28.77
21.00	0.37	0.39	0.64	1.11	0.29	0.38	0.29	0.36	0.29	0.38	0.29	0.36
	29.20	28.93	28.57	27.87	29.60	29.43	29.30	29.03	29.60	29.43	29.30	29.03
MAX	1.26	1.08	1.54	1.11	0.83	1.20	1.25	0.95	1.83	1.53	1.51	2.27
	32.77	32.53	32.20	31.90	31.52	31.62	31.27	30.87	32.10	32.03	32.07	31.97
MIN	0.37	0.37	0.31	0.36	0.15	0.16	0.23	0.24	0.15	0.16	0.23	0.24
	29.20	28.93	28.57	27.87	28.97	29.00	28.87	28.77	27.43	27.40	27.30	27.50

Sumber: Hasil pengukuran (2024)

C. Kandungan CO dan CO₂ dalam Ruangan

Konsentrasi CO₂ meningkat seiring waktu aktivitas, dengan nilai tertinggi 425,90 ppm pada pukul 19.00, sementara CO mencapai 3,48 ppm (Tabel 7). Konsentrasi CO mencapai 3,48 ppm dan CO₂ sebesar 425,90 ppm. Nilai ini melampaui ambang batas yang ditetapkan oleh BSN (2020), yaitu maksimal 0,1 ppm untuk CO dan 350 ppm untuk CO₂ yang menunjukkan sistem ventilasi *existing* belum memadai, sehingga penanganan ventilasi sangat diperlukan untuk kesehatan pengguna.

Table 7. Rata-rata kandungan CO dan CO₂

JAM	HARI PERTAMA			HARI KEDUA			HARI KETIGA		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
10.00	52.41	382.70	2.90	61.28	395.25	3.05			
11.00	49.46	375.47	3.00	54.75	381.03	2.95			
12.00	52.30	368.92	2.95	54.24	379.52	2.98	51.87	377.50	3.03
13.00	52.49	366.83	2.83	53.37	379.20	2.90	49.16	372.12	3.00
14.00	54.37	361.22	2.77	54.36	370.02	2.80	53.78	377.23	3.03
15.00	55.12	346.88	2.75	55.59	381.83	2.83	58.00	375.85	3.07
16.00	56.36	375.58	2.68	53.01	369.18	2.87	50.32	368.88	3.00
17.00	57.62	380.72	2.73	54.29	385.72	2.78	54.61	363.95	3.00
18.00	60.18	423.45	3.03	60.42	404.75	2.98	73.67	395.07	3.18
19.00	66.40	425.90	3.17	62.68	409.35	3.12	77.11	400.57	3.43
20.00	69.47	403.28	3.28	64.27	424.48	3.20	76.43	424.48	3.20
21.00	78.57	412.33	3.48						
MAX	78.57	425.90	3.48	64.27	424.48	3.20	77.11	424.48	3.43
MIN	49.46	346.88	2.68	53.01	369.18	2.78	49.16	363.95	3.00

Sumber: Hasil pengukuran (2024)

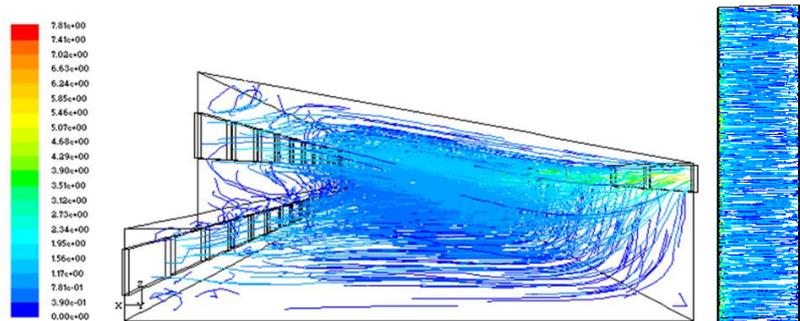
Dari hasil pengukuran ini ditemukan kinerja sirkulasi udara pada gedung futsal *indoor* tidak berfungsi dengan baik. Berdasarkan hasil proses simulasi pada kondisi *existing* dengan memasukkan temperatur maksimal 33.63 °C diperoleh gambaran simulasi pada kondisi *existing* berdasarkan data maksimal yang diperoleh dari pengukuran di lapangan pada gambar di atas

menunjukkan bahwa suhu yang terjadi sekitar 32 °C merata di dalam seluruh gedung. Suhu menurun sebesar satu derajat setelah mencapai bagian dalam ruangan.

Dari hasil pengukuran di lapangan lalu dicari rata-rata kecepatan aliran udara yang masuk ke dalam gedung dan diambil kecepatan aliran udara tertinggi kemudian disimulasikan. Dari hasil studi simulasi pada kondisi *existing* berdasarkan data maksimal yang diperoleh dari pengukuran di lapangan pada gambar di atas menunjukkan bahwa aliran udara yang terjadi dalam gedung itu tidak merata. Dari hasil studi simulasi dapat dilihat kecepatan aliran udara yang masuk itu menurun hingga ke bagian pertengahan dari gedung ini, kemudian kecepatannya meningkat kembali pada saat akan mencapai bukaan yang merupakan *outlet*. Hal ini diakibatkan tidak seimbangannya antara luas bukaan *inlet* dan luas bukaan outlet. Dimana luas bukaan inlet 135,66 m² sedangkan luas bukaan outlet sebesar 85.8 m². Jika bukaan dimana *inlet* besar daripada bukaan *outlet*, hal ini mengakibatkan kecepatan angin yang keluar melalui bangunan akan besar, tetapi kecepatan udara di ruangan akan menurun.

Untuk mencari desain bangunan yang optimal dari segi distribusi temperatur dan sirkulasi aliran udara dalam gedung gelanggang futsal Telkom dilakukan modifikasi yang diharapkan dapat memberikan solusi. Simulasi dilakukan dengan mengambil temperatur dan kecepatan aliran udara tertinggi, kemudian dibuatkan 3 skenario ventilasi alami yang kemudian dibandingkan hasil simulasinya.

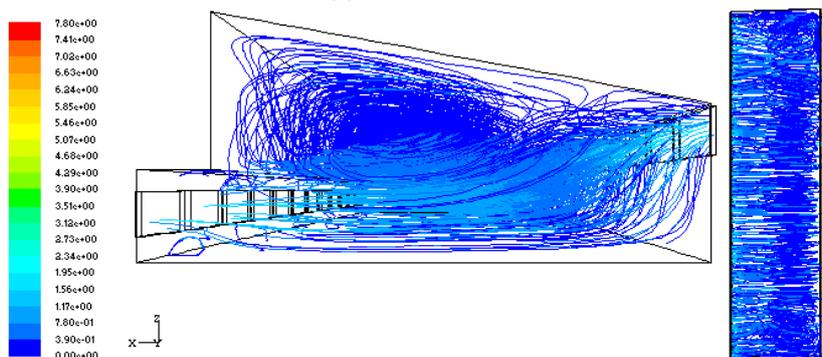
Skenario 1: Penambahan Luas Outlet



Gambar 4. Skenario 1
Sumber: Hasil simulasi (2024)

Penambahan outlet seluas inlet menghasilkan sedikit peningkatan kecepatan udara di area tengah, tetapi belum merata. Pergerakan udara masih terbatas karena posisi outlet berada pada ketinggian yang sulit dijangkau aliran masuk berkecepatan rendah.

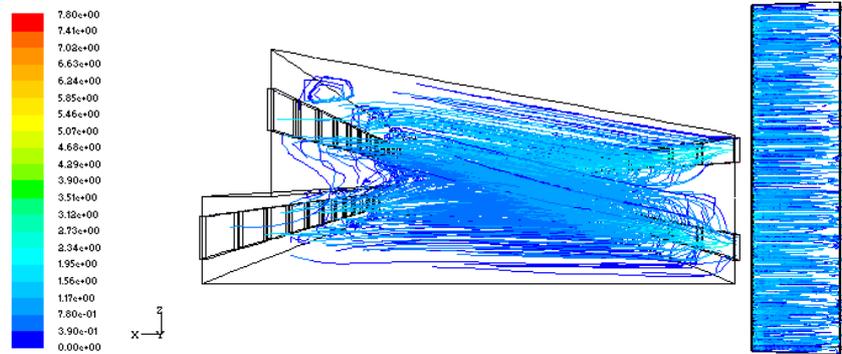
Skenario 2: Penambahan Inlet di Posisi Tinggi



Gambar 5. Skenario 2
Sumber: Hasil simulasi (2024)

Peningkatan jumlah inlet di atas (+6,7 m) memperbaiki aliran udara di bagian atas bangunan. Namun, udara di bagian bawah dan tengah tetap stagnan, menunjukkan tidak seimbang jalur masuk dan keluar.

Skenario 3: Inlet Tinggi + Outlet Rendah



Gambar 6. Skenario 3
Sumber: Hasil simulasi (2024)

Skenario ini menunjukkan hasil terbaik, yaitu kecepatan aliran udara di tengah gedung meningkat hingga 1,5 m/s dengan distribusi yang lebih merata. Udara dari inlet langsung mengarah ke outlet, memungkinkan pembentukan lintasan sirkulasi yang efektif dan optimal.

D. Perbandingan ketiga skenario

Setelah melakukan simulasi dengan 3 skenario, hasil simulasi kemudian dibandingkan dan diperoleh Tabel 8 berikut:

Table 8. Perbandingan kondisi existing dengan hasil simulasi 3 skenario ventilasi

Parameter	Kondisi Existing	Skenario 1 – Tambah Outlet	Skenario 2 – Tambah Inlet Tinggi	Skenario 3 – Inlet Tinggi + Outlet Rendah
Luas Inlet (m ²)	135,66	135,66	271,32	271,32
Luas Outlet (m ²)	85,80	171,60	85,80	171,60
Posisi Inlet	2,5 m dari lantai	Sama seperti existing	Di ketinggian +6,70 m	Di ketinggian +6,70 m
Posisi Outlet	4,5 m dari lantai	Sama seperti existing	Sama seperti existing	Di ketinggian +1 m dari lantai
Kecepatan Aliran Masuk (m/s)	≤ 1,0	≤ 1,0	2,7	2,7
Distribusi Kecepatan di Tengah (m/s)	0,15 – 0,7	0,4 – 1,0	0,5 – 1,2	0,7 – 1,5
Pergerakan Udara di Area Tengah	Tidak merata	Sedikit membaik	Masih stagnan di bawah	Merata dan langsung menuju outlet
Efektivitas Sirkulasi	Rendah	Cukup	Sedang	Tinggi (optimal)
Potensi Penurunan CO/CO ₂	Lambat	Sedikit lebih baik	Sedang	Signifikan

Sumber: Hasil pengukuran (2024)

Tabel perbandingan ketiga skenario ventilasi memperlihatkan dengan jelas bahwa perubahan letak dan luas bukaan udara memberikan pengaruh besar terhadap kualitas sirkulasi di dalam gedung. Pada kondisi awal, aliran udara tidak merata karena udara segar yang masuk dari luar tidak mampu menjangkau area tengah gedung secara optimal. Akibatnya, terjadi penumpukan udara di dalam ruangan. Ketika outlet ditambahkan pada skenario pertama, aliran udara mulai

menunjukkan perbaikan, namun belum cukup untuk mengatasi masalah stagnasi. Hal serupa juga terlihat pada skenario kedua, yaitu ketika inlet ditambahkan di posisi yang lebih tinggi. Udara mulai bergerak di bagian atas ruang, tetapi sirkulasi di bagian bawah masih terbatas. Perubahan paling signifikan terlihat pada skenario ketiga, di mana inlet diletakkan di bagian atas dan outlet ditempatkan lebih rendah. Konfigurasi ini menciptakan aliran udara silang yang lebih seimbang, sehingga udara dapat bergerak lebih merata dan efisien ke seluruh ruangan. Temuan ini menunjukkan bahwa efektivitas ventilasi alami tidak hanya bergantung pada ukuran bukaan, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh penempatan strategis inlet dan outlet untuk menciptakan jalur pergerakan udara yang ideal.

Skenario 3 memberikan konfigurasi ventilasi alami yang paling optimal. Berdasarkan hasil simulasi, posisi vertikal bukaan menjadi faktor kunci dalam menciptakan aliran silang yang efisien. Temuan ini mengonfirmasi pentingnya pendekatan desain berbasis performa (*performance-based design*) dalam perencanaan gedung olahraga *indoor*. Kombinasi inlet dan outlet yang seimbang baik secara luasan maupun posisi vertikal terbukti meningkatkan efisiensi ventilasi alami. Integrasi simulasi CFD sebagai alat bantu desain memberikan wawasan mendalam sebelum implementasi fisik dilakukan.

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem ventilasi existing pada gedung futsal *indoor* belum mampu menjaga sirkulasi udara yang merata, yang ditandai dengan akumulasi dari CO dan CO₂ di bagian tengah gedung futsal. Kondisi ini berpotensi menurunkan kenyamanan dan meningkatkan risiko kesehatan bagi pengguna. Melalui simulasi ANSYS Fluent berbasis CFD, ditemukan bahwa kombinasi penambahan *inlet* pada posisi atas dan *outlet* pada posisi lebih rendah mampu meningkatkan distribusi aliran udara di dalam ruang, dengan kecepatan mencapai 1,5 m/s di area tengah/sentral bangunan. Penataan ulang ventilasi alami, khususnya dengan memperhatikan kesetimbangan luasan bukaan dan posisi vertikal, menjadi solusi efektif untuk meningkatkan performa sirkulasi dan kualitas udara dalam ruang. Temuan ini merekomendasikan integrasi pendekatan desain berbasis performa dalam perencanaan gedung olahraga *indoor* di wilayah tropis. Peningkatan kinerja sirkulasi udara melalui reposisi inlet dan outlet tidak hanya berdampak pada kenyamanan termal, tetapi juga membantu memenuhi batas aman kualitas udara dalam ruang sebagaimana diatur dalam SNI 6390:2011 dan SNI 03-6572-2001 BSN (2001; 2020).

Meskipun penelitian ini memberikan gambaran yang cukup jelas mengenai sirkulasi udara dan kualitas udara dalam gedung futsal *indoor*, ada beberapa hal yang belum tercakup dan dapat menjadi ruang untuk pengembangan ke depan. Studi ini hanya berfokus pada ventilasi alami tanpa mempertimbangkan peran ventilasi mekanis yang sebenarnya umum digunakan dalam operasional gedung sehari-hari. Selain itu, pengukuran kualitas udara terbatas pada suhu, kelembaban, serta kadar CO dan CO₂, sementara polutan lain seperti partikel debu halus atau senyawa kimia (seperti VOC) belum dianalisis. Simulasi yang digunakan juga masih mengasumsikan kondisi aliran udara yang statis, tanpa mempertimbangkan perubahan jumlah pengguna atau intensitas aktivitas fisik di dalam ruangan. Untuk itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengintegrasikan variabel-variabel tersebut agar hasil yang diperoleh dapat lebih menggambarkan kondisi nyata dan menjadi dasar perancangan yang lebih komprehensif bagi bangunan olahraga di iklim tropis.

DAFTAR PUSTAKA

- Allen, J. G. A., & Macomber, J. D. (2020). *Healthy Buildings: How Indoor Spaces Drive Performance and Productivity*. Harvard University Press.
- Alves, C. A., Calvo, A. I., Castro, A., Fraile, R., Evtyugina, M., & Bate-Epey, E. F. (2013). Indoor Air Quality in Two University Sports Facilities. *Aerosol and Air Quality Research*, 13(6).
<https://doi.org/10.4209/aaqr.2013.02.0045>
- Ansari, A., Rao, K. S., & Jain, A. K. (2023). Seismic response and fragility evaluation of circular tunnels in the Himalayan region: Implications for post-seismic performance of transportation infrastructure projects in Jammu and Kashmir. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 137, 105–118.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105118>
- Asphaug, S. K., Jelle, B. P., & Gullbrekken, L. L. (2016). Accelerated ageing and durability of double-glazed sealed insulating window panes and impact on heating demand in buildings. *Energy and Buildings*, 116(395–402).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.015>
- Awbi, H. B. (2003). Ventilation of buildings: Second edition. In *Ventilation of Buildings: Second Edition* (2nd ed.). Spon Press. <https://doi.org/10.4324/9780203634479>
- BSN. (2001). Tata Cara Perancangan Sistem Ventilasi dan Pengkondisian Udara pada Bangunan Gedung. *Sni 03-6572-2001*, 1–55. https://pdfdokumen.com/download/sni-03-6572-2001-tata-cara-perencanaan-sistem-ventilasi-dan-pengkondisian-udara-pada-bangunan-gedung_5a38b43d1723dda9dc05a37e_pdf
- BSN. (2020). Konservasi Energi Sistem Tata Udara Bangunan Gedung. *Sni 03-6390-2020*, 1–39.
- DiNardi, S. R. (2003). *The Occupational Environment: Its Evaluation, Control, and Management* (S. R. DiNardi (ed.); 2nd ed.).
- Guo, W., Liu, X., & Yuan, X. (2015). Study on Natural Ventilation Design Optimization Based on CFD Simulation for Green Buildings. *Procedia Engineering*, 121, 573–581. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.1036>
- Guo, Y., Qian, H., Sun, Z., Cao, J., Liu, F., Luo, X., & Ling, R. (2021). Assessing and controlling infection risk with Wells-Riley model and spatial flow impact factor (SFIF). *Sustainable Cities and Society*, 67(January).
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102719>
- Hemmati, A., & Shahraki, E. (2025). A Review on the Crucial Role of Air Quality in the Workplace : Impacts on Health and Productivity. *3rd International Conference on Management of Health, Safety and Environment*.
https://www.researchgate.net/publication/391941745_A_Review_on_the_Crucial_Role_of_Air_Quality_in_the_Workplace_Impacts_on_Health_and_Productivity
- Mora-Pérez, M., Ignacio, G.-G., & López-Jiménez, P. A. (2017). A CFD study for evaluating the effects of natural ventilation on indoor comfort conditions. *AIMS Environmental Science*, 4(2), 289–309.
<https://doi.org/10.3934/environsci.2017.2.289>
- Sapian, A. R. (2009). Validation of the Computational Fluid Dynamics (CFD) Method for Predicting Wind Flow Around a High-Rise Building (HRB) in an Urban Boundary Layer Condition. *Journal of Construction in Developing Countries*, 14(2), 1–20.
https://www.researchgate.net/publication/267385146_Validation_of_the_Computational_Fluid_Dynamics_CFD_Method_for_Predicting_Wind_Flow_Around_a_High-Rise_Building_HRB_in_an_Urban_Boundary_Layer_Condition
- Seppänen, O., Fisk, W. J., & Lei, Q. H. (2005). Ventilation and Work Performance in Office Work. *Wiley Online Library*, 16(1), 28–36. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2005.00394.x>
- Zhao, B., Liu, Y., & Chen, C. (2020). Air purifiers: A supplementary measure to remove airborne SARS-CoV-2. *Building and Environment*, 177, 106918. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106918>