

Simulasi Penambahan Exhaust Fan untuk Mengurangi Beban AC di Gereja

Vanessa Aulia Geraldine^{1*}, Daniswara Putra Raharjo²

^{1,2} Fakultas Arsitektur dan Desain, Universitas Katolik Soegijapranata

*Email¹: vanessa@unika.ac.id

Abstrak

Bangunan gereja di wilayah tropis sering menghadapi tantangan dalam menjaga kenyamanan termal, terutama ketika ventilasi alami tidak mampu mencukupi kebutuhan sirkulasi udara. Salah satu pendekatan alternatif yang dapat digunakan adalah pemanfaatan exhaust fan untuk membantu meningkatkan sirkulasi udara yang bertujuan mengurangi konsumsi pendingin ruangan AC. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh penambahan exhaust fan terhadap peningkatan sirkulasi udara dan pengurangan kebutuhan sistem pendingin pada bangunan gereja. Metode yang digunakan adalah simulasi aliran udara menggunakan perangkat lunak Rhinoceros dengan plugin Butterfly yang terintegrasi dengan OpenFOAM. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kecepatan aliran udara meningkat dari 0,6 m/s menjadi 1,0 m/s, serta distribusi udara menjadi lebih merata. Perhitungan kebutuhan AC menunjukkan penurunan signifikan yakni hingga 55% setelah exhaust fan diterapkan. Temuan ini menunjukkan bahwa exhaust fan dapat menjadi strategi penghawaan aktif yang efektif dalam menurunkan beban pendinginan dan meningkatkan kenyamanan termal secara pasif. Penelitian ini memberikan rekomendasi awal untuk penerapan ventilasi campuran pada bangunan ibadah tropis.

Kata kunci: exhaust fan, gereja, kenyamanan termal, simulasi CFD, ventilasi aktif.

Abstract

Church building in tropical regions often face challenges in maintaining thermal comfort, especially when natural ventilation is insufficient to meet indoor air circulation needs. One alternative approach that can be utilized is the use of exhaust fans to improve air circulation and reduce the reliance on air conditioning systems. This study evaluates the impact of adding exhaust fans on airflow improvement and the reduction of cooling system requirements in a church building. The method used is airflow simulation using Rhinoceros software with the Butterfly plugin integrated with the OpenFOAM solver. The simulation results show that air velocity increased from 0.6 m/s to 1.0 m/s, with more even airflow distribution throughout the space. The calculation of air conditioning needs also indicates a significant reduction of approximately 55% after the application of exhaust fans. These findings suggest that exhaust fans can serve as an effective active ventilation strategy to reduce cooling loads and enhance passive thermal comfort. This study provides an initial recommendation for the implementation of mixed-mode ventilation in tropical religious buildings.

Keywords: active ventilation, church, CFD simulation, exhaust fan, thermal comfort

I. PENDAHULUAN

Kenyamanan termal merupakan salah satu pertimbangan penting dalam mendesain sebuah bangunan, terutama pada wilayah beriklim tropis yang mempunyai suhu dan kelembapan tinggi sepanjang tahun. Di Indonesia, topografi dan perubahan iklim akan menyebabkan peningkatan permintaan energi untuk pendinginan udara (Veanti et al., 2022). Penggunaan pendingin udara (AC) seringkali menjadi solusi langsung untuk mengatasi permasalahan kenyamanan termal, namun hal tersebut akan memberikan konsekuensi langsung pada konsumsi energi listrik dan biaya operasional.

Gereja sebagai bangunan komunal sering mengalami masalah kenyamanan termal. Sebagai bangunan peribadatan, gereja seringkali menampung banyak orang dalam satu waktu dan memiliki durasi penggunaan yang cukup lama (Reda et al., 2022). Studi kasus yang diangkat dalam penelitian ini adalah Gereja Santa Maria Assumpta Gamping, Sleman, Yogyakarta, bangunan seluas $\pm 710 \text{ m}^2$ yang mengalami kenaikan suhu signifikan saat digunakan untuk kegiatan ibadah. Keterbatasan jumlah dan ukuran ventilasi alami di dalam ruang gereja menyebabkan udara menjadi stagnan dan terasa panas. Penelitian terdahulu mengungkap bahwa keberadaan bukaan jendela yang optimal memengaruhi kenyamanan termal secara signifikan bagi jemaat di dalam gereja (Adi Prabawa et al., 2023; Utomo & Wardoyo, 2022) Hal ini mendorong pihak gereja untuk menggunakan AC secara penuh yang bisa menambah biaya operasional secara signifikan.

Sebagai upaya untuk alternatif untuk penggunaan AC yang banyak mengonsumsi energi, penggunaan exhaust fan dapat dipertimbangkan sebagai alternatif terhadap penggunaan AC yang boros energi. Strategi ventilasi aktif exhaust fan dapat menjadi alternatif yang

lebih berbiaya rendah. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan exhaust fan dalam strategi ventilasi mekanik mampu meningkatkan performa termal bangunan dan mengurangi ketergantungan pada sistem pendingin aktif (Anindita et al., 2022). Exhaust fan dapat berfungsi untuk menciptakan tekanan negatif yang mendorong aliran udara berputar keluar dari dalam bangunan, sehingga dapat mempercepat pergantian udara panas di dalam ruangan. Pendekatan ini dapat menjadi pertimbangan dalam peningkatan kenyamanan termal di gereja yang lebih terjangkau dari sisi biaya operasional.

Untuk mengetahui penambahan exhaust fan untuk mengurangi beban AC, kajian berbasis simulasi dilakukan untuk memahami sejauh mana penggunaan exhaust fan dapat meningkatkan kualitas sirkulasi udara sekaligus mengurangi kebutuhan pendinginan buatan. Simulasi aliran udara melalui pendekatan Computational Fluid Dynamics (CFD) memberikan gambaran visual dan kuantitatif mengenai performa ventilasi dalam berbagai skenario.

II. LANDASAN TEORI

Kenyamanan Termal

Kenyamanan termal merupakan kondisi fisiologis dan psikologis seseorang saat berada dalam ruang, di mana individu tersebut merasa netral terhadap suhu lingkungan, tidak merasa terlalu panas maupun terlalu dingin. Kondisi ini dicapai ketika suhu udara, kelembapan relatif, kecepatan udara, radiasi dari permukaan di sekitarnya, serta faktor personal seperti pakaian dan aktivitas fisik berada dalam rentang yang dapat diterima tubuh manusia (Prasetia & Nugrahaini, 2020)

Standar internasional yang paling banyak digunakan untuk menilai kenyamanan termal saat ini adalah ASHRAE Standard 55. Dalam standar ini, kenyamanan termal didefinisikan sebagai

"kondisi pikiran yang menyatakan kepuasan terhadap lingkungan termal" dan dijelaskan secara kuantitatif melalui dua indeks utama, yaitu PMV (Predicted Mean Vote) dan PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied). Indeks PMV menghitung rata-rata penilaian termal subjektif pengguna dalam skala -3 (sangat dingin) hingga $+3$ (sangat panas), sedangkan PPD memprediksi persentase orang yang kemungkinan tidak puas dengan kondisi termal tersebut (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2023)

Karakteristik Termal dalam Ruang Ibadah (Gereja)

Dalam konteks gereja di iklim tropis sering kali bergantung pada ventilasi alami untuk menjaga suhu dan sirkulasi udara di dalam ruangan. Namun, aktivitas ibadah dalam jumlah besar dapat meningkatkan beban panas internal (*internal heat gain*) secara signifikan. Suhu udara dalam ruangan cenderung meningkat selama prosesi berlangsung, terutama jika ventilasi tidak berfungsi optimal (Dewandaru et al., 2019).

Penelitian oleh Hildegardis et al. (2021) menunjukkan bahwa kenyamanan termal di ruang ibadah sangat dipengaruhi oleh orientasi bangunan, posisi bukaan jendela, serta kecepatan angin di dalam ruang. Kenyamanan termal di gereja-gereja Indonesia sangat dipengaruhi oleh suhu operatif dan kecepatan udara dalam ruang, dengan ventilasi alami berperan besar dalam mendistribusikan udara segar (Hildegardis et al., 2021). Oleh karena itu, pemahaman mengenai karakteristik termal spesifik dalam gereja menjadi penting untuk mendukung desain sistem penghawaan, baik alami maupun buatan.

Beban Pendinginan AC

Beban pendinginan (*cooling load*) adalah jumlah total energi panas yang

harus disingkirkan dari suatu ruangan untuk menjaga suhu yang nyaman bagi penghuni. Pada ruang ibadah seperti gereja, beban ini bersumber dari berbagai komponen: panas yang masuk melalui dinding dan atap, panas dari radiasi matahari melalui bukaan, panas dari aktivitas manusia (jemaat), serta beban internal seperti peralatan elektronik dan pencahayaan. Untuk estimasi awal kebutuhan AC, pendekatan sederhana yang umum digunakan adalah dengan rumus berikut:

Kapasitas AC (PK)=
 $(\text{Volume Ruang (m}^3) \times \text{BTU/m}^3) / 9000$
 Keterangan:

PK adalah satuan umum AC di Indonesia ($1 \text{ PK} \approx 9000 \text{ BTU/h}$). BTU/m^3 adalah angka standar kebutuhan panas per meter kubik berdasarkan jenis aktivitas dan jumlah orang dalam ruang.

Nilai BTU/m^3 bervariasi tergantung tipologi ruang, misalnya untuk gereja bisa berada di kisaran $200\text{--}350 \text{ BTU/m}^3$, tergantung kepadatan jemaat dan penghawaan alami (Bell, 2000).

Ventilasi Udara dan Penghawaan Buatan

Ventilasi merupakan proses pertukaran udara antara dalam dan luar ruang yang bertujuan untuk menjaga kualitas udara, mengurangi kelembapan, serta menunjang kenyamanan termal (Satwiko, 2004). Dalam bangunan tropis seperti gereja, ventilasi memainkan peran krusial dalam mengurangi ketergantungan terhadap sistem pendingin mekanik. Ventilasi alami biasanya mengandalkan bukaan seperti jendela atau ventilasi atap untuk memanfaatkan perbedaan tekanan dan suhu, sedangkan ventilasi mekanik, seperti exhaust fan, digunakan ketika ventilasi alami tidak mencukupi. Untuk menilai kebutuhan ventilasi mekanik,

digunakan pendekatan laju pergantian udara per jam (Air Change per Hour/ACH), yang dinyatakan dalam rumus:

$$V = \text{ACH} \times \text{Volume Ruang}$$

Rumus ini menghasilkan laju aliran udara dalam satuan m^3/s , yang dapat digunakan untuk menentukan spesifikasi kapasitas exhaust fan yang dibutuhkan. Selanjutnya, aliran udara yang masuk atau keluar dari ruang dapat dikonversi menjadi besaran energi panas menggunakan rumus aliran panas udara berikut:

$$Q = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Keterangan:

V = adalah laju aliran udara (m^3/s),

ρ = adalah massa jenis udara ($1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$),

c_p = adalah kapasitas panas jenis udara ($1,005 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$),

ΔT = selisih suhu udara dalam dan luar ruang ($^{\circ}\text{C}$).

Dengan rumus ini, kita dapat menghitung kontribusi ventilasi terhadap pengurangan beban panas dalam satuan Watt atau BTU/h. Selanjutnya, untuk mengetahui jumlah panas yang masih harus ditangani oleh sistem pendingin (AC) setelah sebagian panas dikeluarkan oleh ventilasi, digunakan persamaan berikut:

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{AC}} - Q_{\text{ventilasi}}$$

Keterangan:

Q : jumlah panas yang harus dikeluarkan oleh bantuan AC (BTU/h),

Q_{AC} : total beban panas ruang tanpa ventilasi (BTU/h),

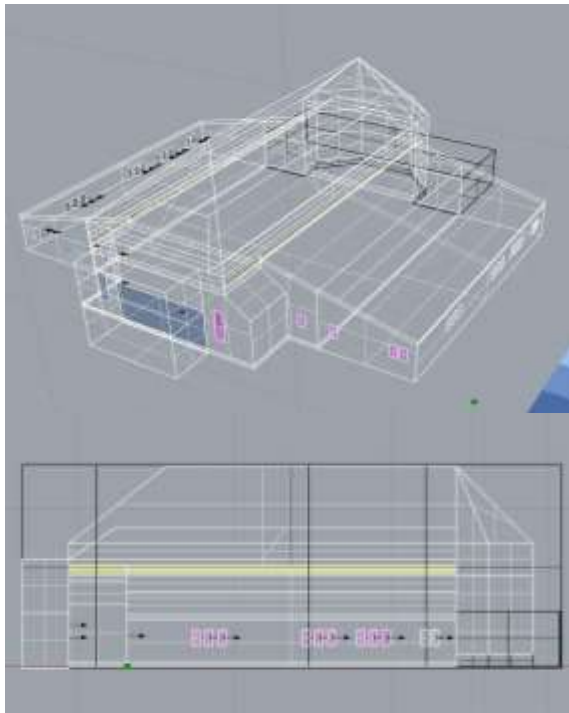
$Q_{\text{ventilasi}}$: total beban panas yang dihilangkan melalui ventilasi alami dan mekanik (BTU/h).

III. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi numerik untuk mengevaluasi pengaruh penambahan exhaust fan terhadap aliran udara dan estimasi pengurangan kebutuhan pendinginan pada ruang gereja tropis. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Rhinoceros 3D dengan plugin Grasshopper dan Butterfly, yang mengakses solver OpenFOAM untuk analisis Computational Fluid Dynamics (CFD).

Pemodelan akan menggunakan bentuk dalam bangunan Gereja St Maria Assumpta Gamping dengan skala 1:1 dengan total volume Total volume bangunan yang digunakan dalam perhitungan adalah $3.763,2 \text{ m}^3$.

Elemen yang digunakan dalam simulasi adalah jendela, dinding, plafon, dan lantai. Elemen lain-lain seperti kursi, meja dan tangga tidak dimasukkan ke dalam pemodelan. Simulasi akan menggunakan 2 model bangunan, model pertama merupakan kondisi eksisting dari Gereja St Maria Assumpta Gamping dan model kedua merupakan bangunan Gereja St Maria Assumpta Gamping yang sudah ditambahkan exhaust fan. Model akan dibuat di Rhinoceros 7.0 sebagai pembuat model dan untuk menampilkan hasil simulasi.



Gambar 1. *Pemodelan Simulasi Kondisi Eksisting Gereja St Maria Assumpta Gamping*

Sumber: Analisis Penulis, 2025

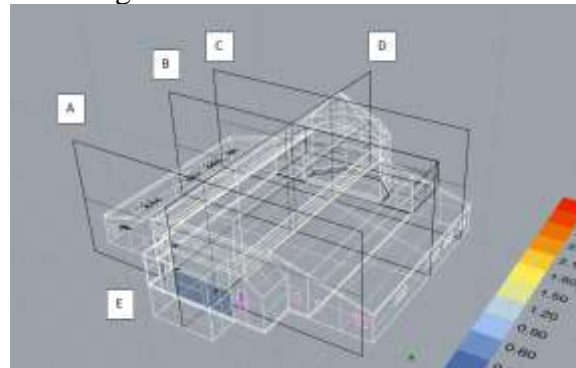
Simulasi sirkulasi dan kecepatan udara dilakukan menggunakan plugin Butterfly pada Grasshopper, dengan solver CFD OpenFOAM. Dua skenario yang dianalisis yaitu:

- Skenario 1 (Eksisting): ventilasi alami melalui jendela-jendela eksisting.
- Skenario 2 (Intervensi): penambahan 18-unit exhaust fan (masing-masing 1000 CFM) pada posisi tertentu.

Data iklim untuk lokasi penelitian di Kecamatan Gamping, Sleman, diperoleh dari sumber daring berupa EnergyPlus Weather Data yang didapatkan dari Ladybug Tools dan laporan cuaca historis yang dipublikasikan oleh Weatherspark (Ladybug Tools, 2025; Weatherspark, 2025)

- Suhu luar ruangan: 30°C
- Kecepatan angin: 1,2 m/s, arah selatan
- Densitas udara (ρ): 1,2 kg/m³

- Kapasitas panas udara (C_p): 1005 J/kg·K



Gambar 2: *Boundary representation*

Sumber: Analisis Penulis, 2025

Dalam melakukan simulasi dengan menggunakan Butterfly akan menampilkan sirkulasi pergerakan angin di dalam ruangan melalui garis panah dan warna. Pergerakan angin yang disimulasikan akan ditampilkan dalam beberapa bidang datar (*Boundary Representation*) yang dianggap menjadi representasi dari sirkulasi bangunan itu sendiri, dengan penjelasan sebagai berikut:

- A = Bidang vertikal dekat pintu masuk
- B = Bidang vertikal tengah bangunan
- C = Bidang vertikal dekat Altar
- D = Bidang vertikal arah diagonal
- E = Bidang horizontal (1,25-meter dari permukaan tanah).

Perhitungan kebutuhan AC dilakukan berdasarkan kapasitas pendinginan dalam satuan BTU/h, dengan konversi ke PK (Paardekracht). Selain itu, dihitung kontribusi ventilasi terhadap pengurangan beban termal menggunakan rumus perpindahan panas udara:

$$Q=V \cdot \rho \times C_p \times \Delta T$$

Di mana V adalah laju aliran udara (m³/s). Hasil simulasi dan perhitungan digunakan untuk membandingkan kebutuhan AC sebelum dan sesudah pemasangan exhaust fan. Simulasi menghasilkan peta distribusi aliran udara

dalam bentuk vektor arah dan kecepatan angin.

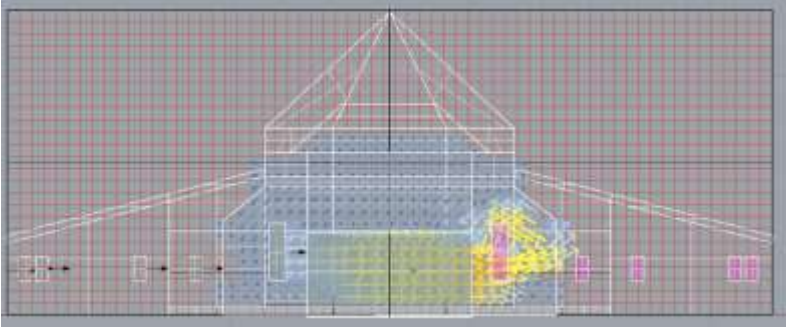
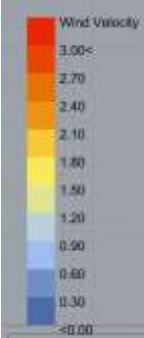
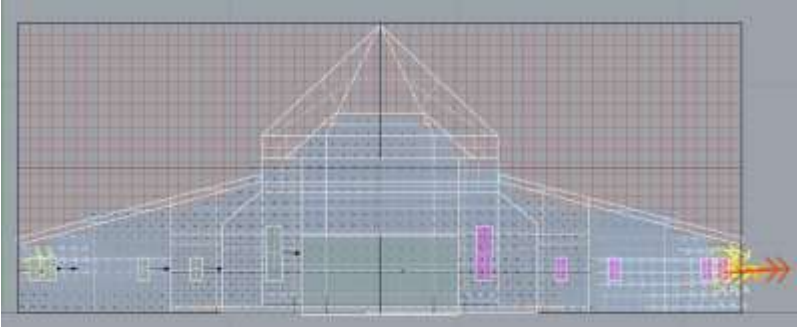
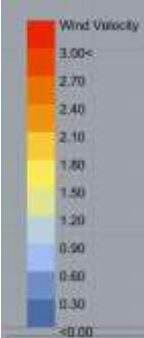
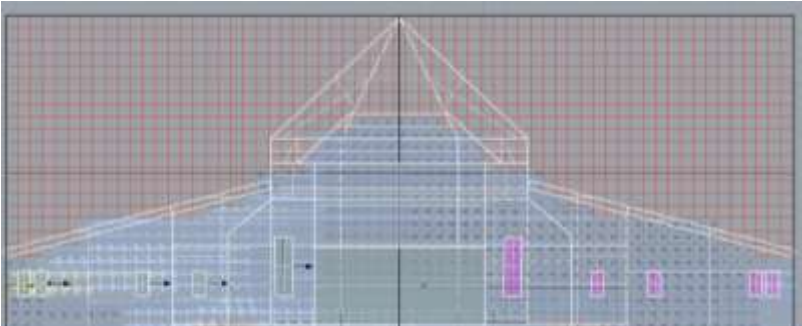
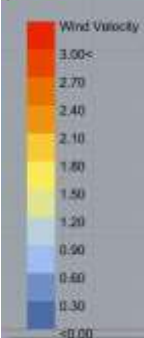
IV. HASIL SIMULASI

Simulasi Kondisi Eksisting

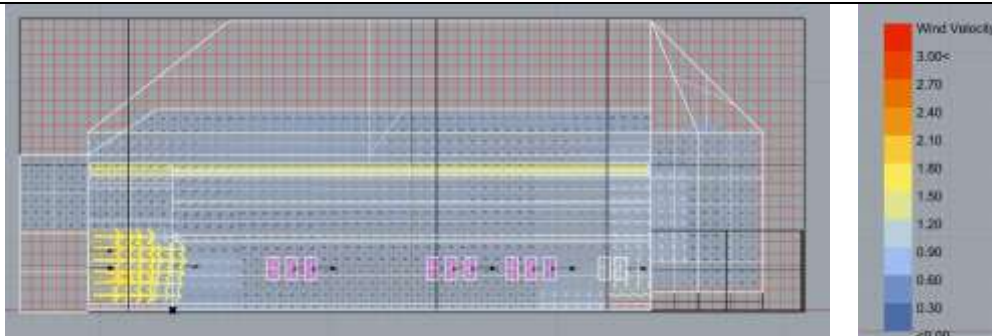
Pada kondisi eksisting, Gereja St Maria Assumpta Gamping belum menggunakan

sistem penghawaan buatan seperti AC atau exhaust fan. Sirkulasi udara hanya bergantung pada ventilasi alami. Berdasarkan hasil simulasi CFD menggunakan plugin Butterfly pada Grasshopper, didapati bahwa aliran udara di dalam ruang bangunan bersifat tidak merata.

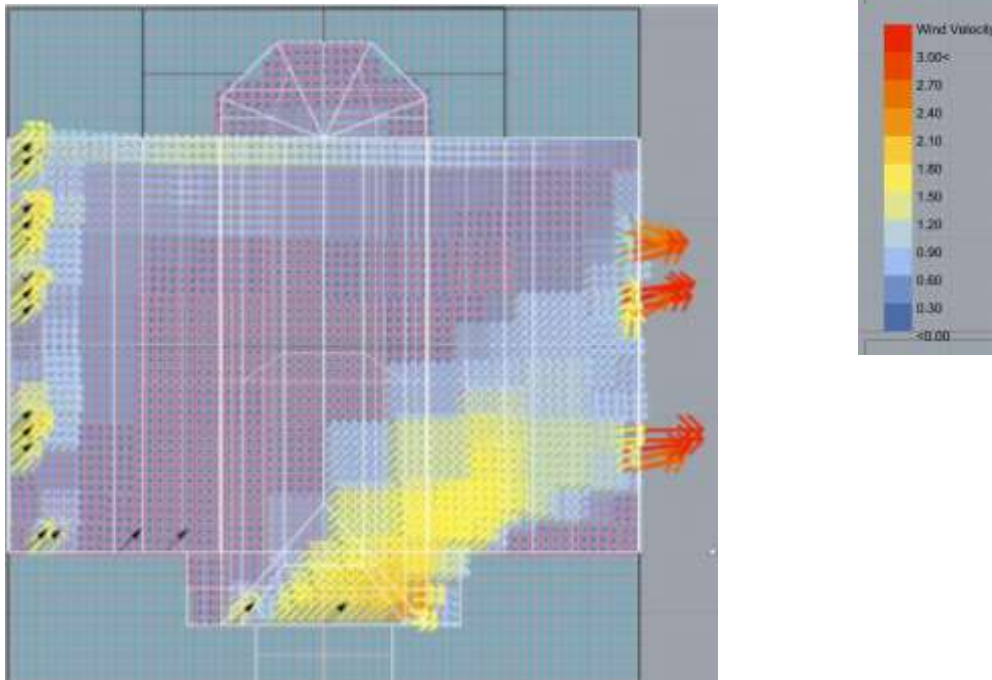
Tabel 2. Hasil Simulasi Setelah Penambahan Exhaust Fan

Kode	Hasil Simulasi	Kode Warna
A		
B		
C		

D



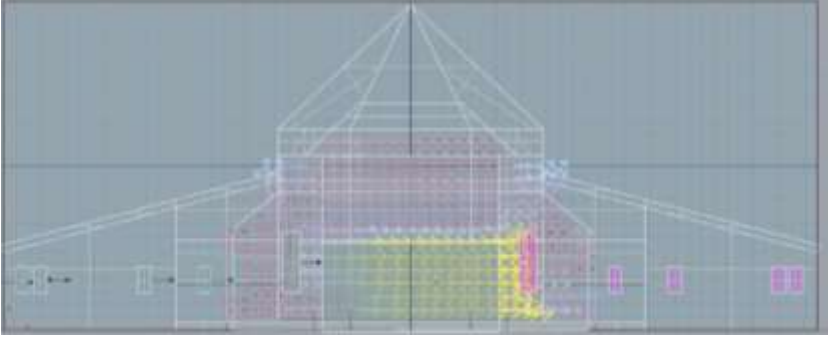
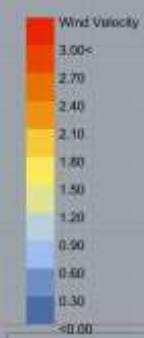
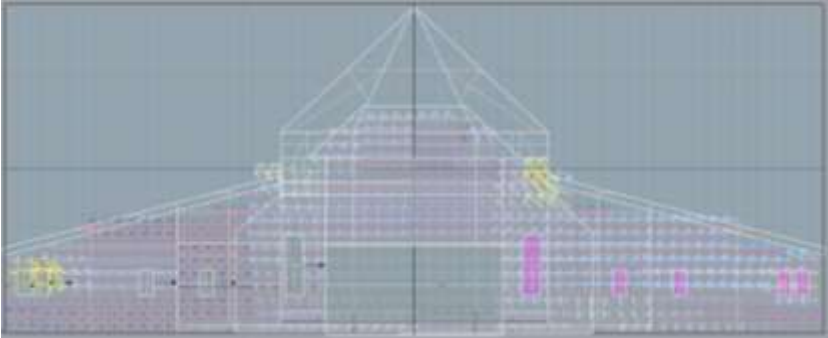
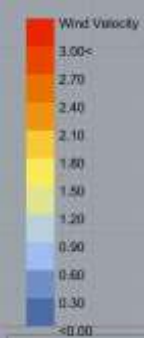
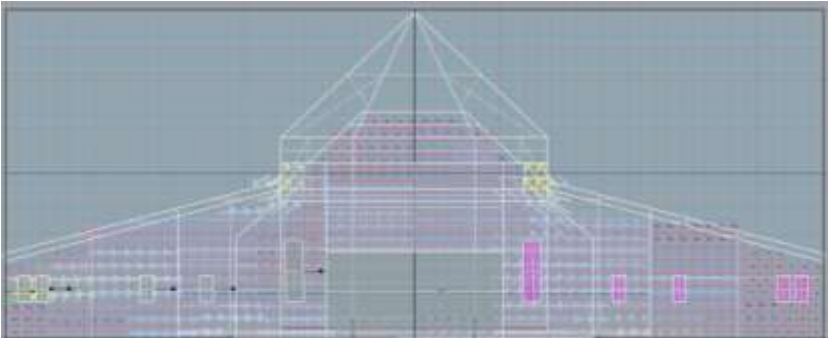
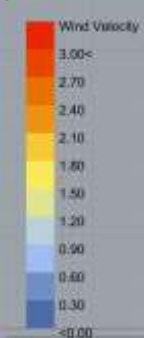

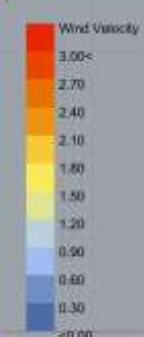
E



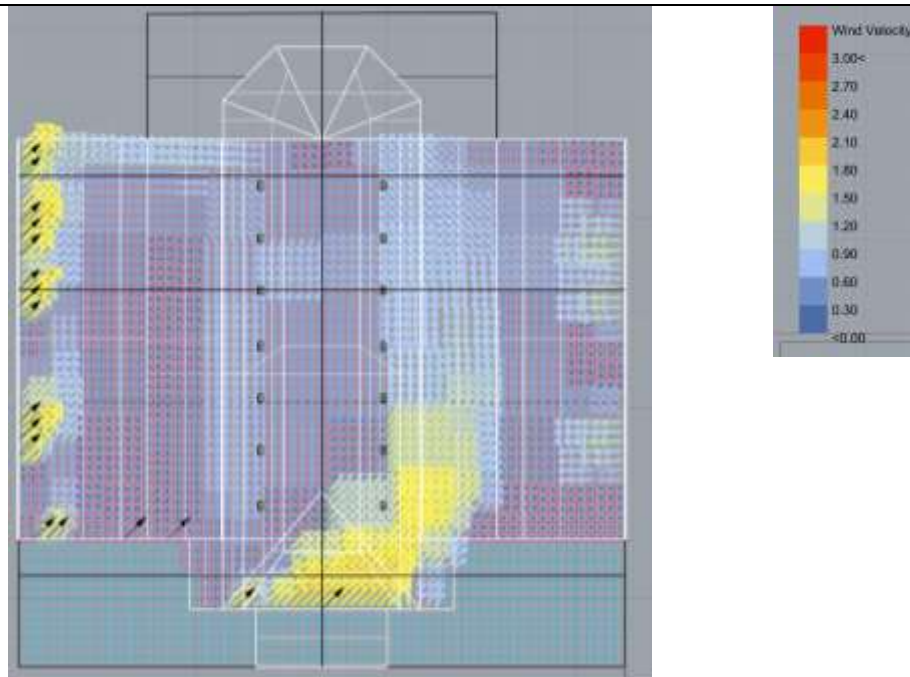
Kecepatan aliran udara cenderung tinggi di sekitar area jendela, namun melemah secara signifikan di area tengah dan altar. Bidang pengamatan B (tengah ruangan) dan C (dekat altar) menunjukkan kecepatan angin kurang dari 0,6 m/s, ditandai dengan dominasi warna biru tua pada visualisasi simulasi. Hal ini menunjukkan bahwa ventilasi alami belum cukup menjangkau area sentral yang digunakan oleh jemaat, sehingga kenyamanan termal berpotensi terganggu.

Simulasi Setelah Penambahan Exhaust Fan

Tabel 2. Hasil Simulasi Setelah Penambahan Exhaust Fan

Kode	Hasil Simulasi	Kode Warna
A		
B		
C		
D		

E



Berdasarkan hasil simulasi dapat terlihat bahwa kecepatan angin dan arah angin di dalam bangunan mengalami perubahan dari kondisi eksisting. Hal ini dapat ditunjukkan oleh perubahan warna secara keseluruhan dapat terlihat bahwa warna lebih cenderung menunjukkan dominasi warna biru muda (± 1.00 m/s). Sirkulasi dalam bangunan juga terlihat lebih merata hingga ke tengah-tengah bangunan menunjukkan bahwa kinerja yang dihasilkan cukup signifikan.

$$\begin{aligned} \Delta V &= V_{\text{sesudah}} - V_{\text{sebelum}} \\ &= 1.0 - 0.6 = 0.4 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Peningkatan kecepatan udara sebesar 0.4 m/s menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan udara hingga 66,67%. Exhaust fan biasanya akan menyebabkan penurunan suhu dalam ruangan dengan memperbaiki sirkulasi udara. Peningkatan kecepatan udara tidak secara langsung akan mengakibatkan penurunan suhu ruangan. Dalam beberapa penelitian, dapat ditemukan bahwa peningkatan kecepatan udara sekitar 50-100% dapat menurunkan suhu yang

dirasakan (misalnya dalam konteks thermal comfort) sekitar 5-15%.

Perhitungan Kebutuhan AC

- Sebelum Penambahan Exhaust Fan Kebutuhan pendinginan bangunan dihitung berdasarkan volume total bangunan sebesar 3.763,2 m³, dengan asumsi beban panas sebesar 200 BTU per m³ (standar umum untuk ruang besar di iklim tropis), maka:

$$\begin{aligned} \text{BTU total} &= 3.763,2 \times 200 = 752.640 \\ \text{BTU/h} / 9.000 &= 83,6 \approx 83 \text{ PK} \end{aligned}$$

- Sesudah Penambahan Exhaust Fan Setelah ditambahkan 18-unit exhaust fan (1.000 CFM per unit) dan memaksimalkan ventilasi silang, terjadi pengurangan beban panas sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Q_{\text{exhaust}} &= 175.020 \text{ BTU/h} \\ Q_{\text{cross ventilation}} &= 244.423 \text{ BTU/h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Total Q ventilasi} &= \\ Q_{\text{exhaust}} + Q_{\text{cross}} &= 419.443 \text{ BTU/h} \end{aligned}$$

Beban panas yang harus ditangani AC setelah ventilasi aktif:

$$Q_{\text{AC baru}} = Q_{\text{total}} - Q_{\text{ventilasi}}$$

Q AC baru = $752.640 - 419.443 = 333.197$ BTU/h

Konversi ke kebutuhan AC dalam PK:
 $333.197 / 9.000 = 37$ -unit AC 1 PK

Dengan demikian, penambahan exhaust fan mampu mengurangi kebutuhan AC hingga sekitar 55%. Meskipun hasil simulasi menunjukkan perbaikan yang nyata pada aspek sirkulasi udara, perlu dicatat bahwa simulasi ini menggunakan model geometri yang disederhanakan, tanpa mempertimbangkan elemen furnitur, pergerakan jemaat, dan fluktuasi suhu waktu nyata. Oleh karena itu, nilai-nilai yang diperoleh bersifat indikatif. Namun demikian, pendekatan ini dapat digunakan sebagai dasar pertimbangan awal dalam perencanaan strategi penghawaan campuran (mixed-mode ventilation) pada bangunan serupa.

V. SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan exhaust fan pada bangunan Gereja St Maria Assumpta Gamping memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan sirkulasi udara di dalam ruangan. Hasil simulasi CFD menunjukkan bahwa kecepatan aliran udara meningkat dari sekitar 0,6 m/s menjadi 1,0 m/s, dengan distribusi yang lebih merata hingga ke area tengah dan altar. Dari sisi beban pendinginan, penggunaan exhaust fan dan ventilasi silang mampu mengurangi kebutuhan AC dari 83 PK menjadi 37 PK (AC 1 PK) atau setara dengan pengurangan $\pm 55\%$. Ini menunjukkan bahwa strategi ventilasi aktif dapat menjadi solusi awal untuk menurunkan beban termal secara signifikan sebelum mempertimbangkan penggunaan AC secara penuh. Diharapkan hasil penelitian ini dapat menjadi referensi awal bagi pengelola bangunan ibadah atau ruang komunal lainnya dalam menerapkan strategi penghawaan campuran (mixed-

mode ventilation) yang lebih efisien dan hemat energi.

Keterbatasan Penelitian.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yakni pemodelan bangunan disederhanakan dan tidak mencakup elemen-elemen interior seperti furnitur, kehadiran jemaat, serta fluktuasi suhu waktu nyata. Data iklim dan kecepatan angin menggunakan data sekunder dari situs daring, bukan hasil pengukuran langsung di lokasi. Selain itu, simulasi dilakukan dalam kondisi *steady-state* dan tidak mempertimbangkan dinamika waktu seperti perubahan intensitas cahaya matahari atau variabilitas arah angin. Meskipun demikian, pendekatan ini tetap memberikan gambaran awal yang berguna untuk memahami potensi peran ventilasi aktif dalam mengurangi beban pendinginan. Diperlukan penelitian lanjutan yang dilengkapi dengan data lapangan dan validasi eksperimental guna memperkuat hasil yang diperoleh.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- Adi Prabawa, E. K., Purwanto, L. M. F., & Ardiyanto, A. (2023). Evaluasi Kenyamanan Termal Gereja Kristen Jawa Salatiga. *Jurnal Lingkungan Karya Arsitektur*, 2(1), 57–69.
<https://doi.org/10.37477/lkr.v2i1.1347>
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2023). *ANSI/ASHRAE Standard 55-2023: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*.
<https://www.ashrae.org>
- Anindita, M. K. A., Ola, F. B., Suwarno, N., & Sekarlangit, N. (2022). Utilization of building design performance simulation in the

- architectural design studio process. *ARTEKS : Jurnal Teknik Arsitektur*, 7(2), 163–174. <https://doi.org/10.30822/arteks.v7i2.1391>
- Bell, A. A. (2000). *HVAC: Equations, data, and rules of thumb*. McGraw-Hill.
- Dewandaru, A., Budi, W. S., & Hardiman, G. (2019). Pengaruh Desain Penghawaan terhadap Kondisi Termal di Gereja Santo Petrus Sambiroto Semarang. *ARSITEKTURA*, 17(2), 231. <https://doi.org/10.20961/arst.v17i2.30676>
- Hildegardis, C., Saraswati, A. A. A. O., Putra, I. D. G. A. D., & Dewi, N. K. A. (2021). Comparison of Static Model, Adaptation Study, and CFD Simulation in Evaluating Thermal Comfort Based on Köppen Climate Classification System in Churches in Indonesia. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 53(6), 210606. <https://doi.org/10.5614/j.eng.techno.1.sci.2021.53.6.6>
- Ladybug Tools. (2025). *Ladybug EPW Map*. <https://www.ladybug.tools/epwmap/>
- Prasetya, A. K., & Nugrahaini, F. T. (2020). Kenyamanan Termal pada Masjid Baitul Makmur Pabelan. *Prosiding Seminar Ilmiah Arsitektur (SIAR) Universitas Muhammadiyah Surakarta*, 5(1), 579–600.
- Reda, I., AbdelMessih, R. N., Steit, M., & Mina, E. M. (2022). Experimental assessment of thermal comfort and indoor air quality in worship places: The influence of occupancy level and period. *International Journal of Thermal Sciences*, 179, 107686. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107686>
- Satwiko, P. (2004). *Fisika Bangunan* (Vol. 1). Penerbit Andi.
- Utomo, D. A. B., & Wardoyo, J. (2022). Pengaruh bukaan jendela terhadap kenyamanan termal di Gereja Mater Dei, Madiun. *Urnal Mahasiswa Departemen Arsitektur Universitas Brawijaya*, 10, 2.
- Veanti, D. P. O., Virgianto, R. H., & Astiduari, I. G. A. P. P. (2022). The Impact of Climate Change on Cooling Energy Demand in Indonesia Based on Representative Concentration Pathways (RCP) Scenarios. *Science and Technology Indonesia*, 7(1), 9–16. <https://doi.org/10.26554/sti.2022.7.1.9-16>
- Weatherspark. (2025). *Iklim, Cuaca Menurut Bulan, Suhu Rata-Rata Gamping Lor (Indonesia)—Weather Spark*. <https://id.weatherspark.com/y/121538/Cuaca-Rata-rata-pada-bulan-in-Gamping-Lor-Indonesia-Sepanjang-Tahun>