PENINGKATAN KUALITAS PENGHAWAAN ALAMI MELALUI DESAIN BUKAAN JENDELA PADA RUANG KELAS DENGAN SIMULASI CFD

Studi kasus : SMAN 9 Yogyakarta

M. Arvin Hakim H.[1], Etik Mufida[2] , Hafiza Denisya Chairani[3]
[1]Jurusan Arsitektur, Universitas Islam Indonesia
[1]Surel: 21512131@students.uii.ac.id

***ABSTRAK**: Penghawaan alami sangat penting untuk menciptakan lingkungan yang sehat dan nyaman dengan meningkatkan kualitas udara di dalam ruangan. Banyak bangunan menghadapi tantangan dalam mengoptimalkan penghawaan alami akibat desain bukaan yang tidak memadai, seperti minimnya aliran udara yang efektif dan ketidakmampuan memanfaatkan angin secara optimal. SMAN 9 Yogyakarta mengalami permasalahan serupa karena desain jendela yang kurang optimal. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas desain bukaan jendela dalam meningkatkan kualitas penghawaan alami di ruang kelas SMAN 9 Yogyakarta dan memberikan solusi praktis tanpa mengubah letak bukaan atau elemen struktural lainnya. Metode yang digunakan adalah simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) untuk menganalisis kecepatan dan arah aliran udara dari tiga desain bukaan jendela: jendela casement (engsel samping), jendela hopper (engsel atas), dan jendela awning (kanopi). Hasil simulasi menunjukkan bahwa desain jendela casement menghasilkan aliran udara dengan kecepatan 0,4-2 m/s dan distribusi udara yang lebih merata dibandingkan jendela hopper dan awning. Kesimpulan dari penelitian ini adalah desain jendela casement merupakan solusi terbaik untuk meningkatkan penghawaan alami dan kenyamanan di ruang kelas, serta dapat digunakan sebagai panduan untuk perbaikan desain penghawaan di sekolah-sekolah lain.*

***Kata kunci:** desain bukaan jendela, arah aliran udara, penghawaan alami, sman 9 yogyakarta, simulasi cfd*

PENDAHULUAN

Sekolah merupakan lingkungan yang krusial bagi perkembangan siswa, karena disinilah mereka menghabiskan sebagian besar waktu untuk belajar dan berinteraksi sosial. Kualitas lingkungan fisik di sekolah, termasuk kualitas udara dalam ruangan, memiliki dampak signifikan terhadap kesehatan dan kinerja akademik siswa. Menurut Afshari et al. (2022), kualitas udara yang baik di dalam ruangan dapat mengurangi risiko gangguan kesehatan, meningkatkan konsentrasi, dan mendukung produktivitas siswa. Salah satu aspek utama dalam menciptakan lingkungan yang sehat adalah sistem penghawaan alami yang efektif. Penghawaan alami memanfaatkan pergerakan udara alami, seperti angin dan perbedaan suhu, untuk meningkatkan kualitas udara di dalam ruangan dan menghilangkan polutan.Penghawaan alami yang efektif dapat dicapai melalui desain bukaan yang strategis, seperti jendela dengan berbagai jenis bukaan, ventilasi silang, dan penggunaan elemen arsitektural untuk memandu aliran udara. Desain bukaan jendela yang optimal dapat meningkatkan arah aliran udara dan memastikan distribusi udara yang merata di seluruh ruangan. Di negara tropis seperti Indonesia, penghawaan alami sangat penting karena dapat mengurangi kebutuhan energi untuk pendinginan ruangan dan meningkatkan kenyamanan termal.

Namun, banyak sekolah, termasuk SMAN 9 Yogyakarta, menghadapi tantangan dalam penerapan sistem penghawaan alami yang optimal. SMAN 9 Yogyakarta menggunakan jenis bukaan jendela *awning*, yang dirancang untuk melindungi dari hujan sambil memungkinkan aliran udara masuk. Meskipun desain ini memiliki beberapa keuntungan, bukaan jendela awning yang terbatas dapat menghambat aliran udara yang optimal, terutama jika tidak diimbangi dengan desain ventilasi silang atau bukaan lain yang lebih besar. Akibatnya,

ruangan sering mengalami stagnasi udara dan kelembapan tinggi, serta ketidakmampuan untuk memanfaatkan angin secara optimal. Hal ini memaksa sekolah untuk mengandalkan pendingin udara yang mengkonsumsi energi tinggi, yang bertentangan dengan prinsip green building yang mereka usung.

Moore (1993) menegaskan bahwa dalam sistem pendinginan pasif, desain ventilasi yang efektif tidak hanya memerlukan pertukaran udara yang memadai antara interior dan eksterior, tetapi juga harus memperhitungkan mekanisme pendinginan tubuh melalui konveksi dan evaporasi, yang mendukung urgensi penelitian ini dalam mengoptimalkan desain bukaan jendela untuk meningkatkan kualitas udara dan kenyamanan termal di ruang kelas SMAN 9 Yogyakarta.

Meskipun SMAN 9 Yogyakarta dikenal dengan konsep green building, desain jendela *awning* yang ada saat ini menghambat efektivitas penghawaan alami. Hal ini dapat mengurangi kualitas udara dalam ruang kelas, yang berdampak pada kesehatan dan kenyamanan siswa. Al Asir et al. (2023) mengidentifikasi bahwa desain bukaan yang tidak optimal dapat menyebabkan kualitas udara yang buruk di dalam ruang kelas, suatu aspek yang sering terabaikan dalam desain bangunan sekolah.

Berdasarkan permasalahan yang diidentifikasi, hipotesis dari penelitian ini adalah: "Desain bukaan jendela yang dioptimalkan dapat meningkatkan penghawaan alami di ruang kelas SMAN 9 Yogyakarta, mengurangi ketergantungan pada sistem pendingin udara, dan mendukung pencapaian standar green building yang lebih baik

STUDI PUSTAKA

Desain bukaan



Gambar 1. Ilustrasi Desain Bukaan
Sumber : glazingcentre.co.uk

Desain bukaan adalah elemen penting dalam arsitektur yang mempengaruhi kenyamanan dan efisiensi bangunan. Bukaan seperti jendela dan ventilasi berperan dalam mengatur pencahayaan alami, ventilasi, dan aliran udara, yang berdampak pada kenyamanan penghuni dan efisiensi energi. Penelitian menunjukkan bahwa desain bukaan yang baik dapat mengurangi konsumsi energi dan meningkatkan kualitas lingkungan dalam ruangan.

Desain bukaan berperan penting dalam penghawaan alami karena kemampuannya untuk memfasilitasi aliran udara dari luar ke dalam ruangan. Seperti yang dijelaskan dalam studi Nugroho et al. (2019), bukaan yang tepat tidak hanya mengoptimalkan pencahayaan alami, tetapi juga memungkinkan sirkulasi udara yang lebih baik, sehingga mengurangi ketergantungan pada pendinginan buatan. Penelitian ini menekankan bahwa dengan memanfaatkan aliran angin dari luar, bukaan berfungsi sebagai mekanisme pendingin alami, yang dapat meningkatkan kenyamanan penghuni dan mengurangi konsumsi energi.

Halim et al. (2020) juga menunjukkan bahwa konfigurasi bukaan yang dirancang secara efektif mampu meningkatkan aliran udara di dalam ruangan, mengurangi akumulasi panas, dan menjaga suhu dalam ruangan tetap nyaman. Begitu pula Wulandari dan Setiawan (2021) menegaskan pentingnya ukuran dan posisi bukaan untuk memastikan udara segar masuk ke dalam ruangan, menggantikan udara panas, serta menciptakan lingkungan yang sejuk tanpa memerlukan pendinginan mekanis. Studi-studi ini menunjukkan bahwa desain

bukaan yang optimal sangat berpengaruh dalam meningkatkan penghawaan alami dan memberikan efek pendinginan yang signifikan bagi pengguna dalam ruangan.

Arah aliran udara



Gambar 2. Ilustrasi Sirkulasi Udara
Sumber : yourhome.gov.au

Arah aliran udara sangat penting dalam desain ventilasi alami karena berhubungan langsung dengan kenyamanan dan kesehatan pengguna ruang. Aliran udara yang baik memungkinkan udara segar masuk dan mengalir secara efektif di dalam ruangan, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai pendingin alami. Sopian et al. (2022) menekankan bahwa konfigurasi bukaan yang tepat dapat meningkatkan efisiensi aliran udara, yang berdampak pada distribusi udara segar secara merata di seluruh ruangan. Hal ini memastikan bahwa setiap pengguna ruang mendapatkan aliran udara yang cukup untuk menjaga kenyamanan termal.

Selain itu, Utami et al. (2021) menjelaskan bahwa desain ventilasi yang memperhitungkan arah angin dapat memaksimalkan pemanfaatan angin sebagai mekanisme pendingin alami, mengurangi ketergantungan pada pendingin buatan seperti AC. Dalam ruangan, penting agar aliran udara mengarah pada pengguna dan dapat keluar dengan mudah, sehingga sirkulasi udara tetap lancar. Dengan memperhatikan arah aliran udara, kualitas udara dalam ruangan meningkat, kenyamanan pengguna terjaga, dan risiko akumulasi panas dapat diminimalisir.

Penghawaan alami

Penghawaan alami adalah aspek penting dalam desain bangunan yang bertujuan menciptakan lingkungan yang sehat dan nyaman dengan memanfaatkan aliran udara alami. Konsep ini melibatkan penggunaan ventilasi alami melalui bukaan seperti jendela dan ventilasi untuk meningkatkan kualitas udara dan mengurangi ketergantungan pada pendingin buatan.



Gambar 3. Ilustrasi Penghawaan Alami
Sumber : floodprecast.co.uk 2014

Menurut Moore dan Fuller (1993), penghawaan alami dapat dibagi menjadi kategori-kategori seperti pendinginan ventilatif, yang melibatkan pembuangan udara hangat dari bangunan dan penggantian dengan udara luar yang lebih sejuk. Hal ini dilakukan dengan memanfaatkan pergerakan udara yang dihasilkan oleh angin atau efek cerobong (stack effect) dalam aplikasi pasif, sementara dalam aplikasi hibrida, pergerakan udara dapat dibantu oleh kipas. Pendinginan tubuh secara konvektif terjadi ketika temperatur udara yang mengalir lebih rendah daripada suhu tubuh pengguna ruang, sedangkan pendinginan

evaporatif terjadi ketika kelembaban udara lebih rendah daripada kelembaban udara jenuh pada permukaan tubuh pengguna, sehingga laju evaporasi meningkat.

Arifin dan Prawito (2020) menyebutkan bahwa penghawaan alami yang baik meningkatkan kenyamanan, kualitas udara, dan mengurangi konsumsi energi. Rizal dan Hadi (2021) menemukan bahwa desain bukaan yang efektif, seperti di Kafe Tanatap, meningkatkan kenyamanan dan menciptakan suasana sehat dengan integrasi yang baik antara penghawaan dan pencahayaan alami. Andhika Danu Dwi Prasetya (2023) menambahkan bahwa desain penghawaan yang tepat dapat menghemat energi dengan mempertimbangkan faktor angin dan matahari.

Supriyadi dan Aulia (2020) menunjukkan bahwa sistem ventilasi alami yang baik dapat meningkatkan kualitas udara di sanatorium, mengurangi ketergantungan pada pendingin buatan. Sutrisno dan Siregar (2021) menambahkan bahwa penghawaan alami juga dapat mengurangi penggunaan AC dan jejak karbon. Pada desain ruang kelas, Wijaya dan Utami (2022) menekankan pentingnya penghawaan alami untuk meningkatkan aliran udara, mengurangi kelembaban, dan meningkatkan kenyamanan siswa. Secara keseluruhan, penerapan penghawaan alami yang efektif membantu memperbaiki kualitas udara, mengurangi penggunaan energi, serta mendukung kesehatan dan kenyamanan penghuni

SMAN 9 Yogyakarta



Gambar 4. Bangunan SMAN 9 Yogyakarta
Sumber : sman9jogjagurualumni.blogspot.com

SMA Negeri 9 Yogyakarta, yang berlokasi di Jl. Sagan No. 1, Terban, Kec. Gondokusuman, Kota Yogyakarta, dikenal dengan sebutan "The Art and Culture School of Jogja." Sebagai sekolah yang berbasis seni dan budaya, SMAN 9 Yogyakarta berfokus pada pengembangan bakat siswa di bidang seni, budaya, dan kreativitas, sambil menyediakan berbagai fasilitas pendidikan seperti ruang kelas, laboratorium, ruang seni, dan perpustakaan.

Namun, SMAN 9 Yogyakarta menghadapi tantangan terkait desain ventilasi yang kurang efektif. Desain bukaan ventilasi yang ada tidak sepenuhnya sesuai dengan iklim tropis Yogyakarta, menyebabkan aliran udara yang tidak optimal. Akibatnya, banyak ruang kelas dan ruang kegiatan lainnya sering terasa panas dan pengap, terutama pada siang hari, yang mengarah pada ketergantungan pada pendingin buatan seperti AC dan kipas angin. Penggunaan pendingin ini meningkatkan konsumsi energi dan biaya operasional serta tidak selalu efektif dalam jangka panjang.

Untuk mengatasi masalah ini, diperlukan perbaikan desain ventilasi alami di SMAN 9 Yogyakarta. Ventilasi alami yang optimal dapat dicapai dengan merancang ulang bukaan untuk memaksimalkan aliran udara, mempertimbangkan arah angin, dan mengurangi panas yang terperangkap di dalam bangunan. Penerapan ventilasi silang dan penggunaan material yang mendukung sirkulasi udara dapat mengurangi ketergantungan pada pendingin buatan, menurunkan konsumsi energi, dan menciptakan lingkungan belajar yang lebih sehat dan nyaman, sekaligus mendukung upaya sekolah dalam menjaga kelestarian lingkungan.

Simulasi CFD

Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah alat kunci untuk mensimulasikan aliran fluida dan membantu desain di berbagai bidang teknik dan sains. Salah satu penerapan penting

CFD adalah integrasinya dengan *Building Information Modeling* (BIM), seperti dijelaskan oleh Hasan et al. (2023). Mereka menunjukkan bahwa menggabungkan BIM dan CFD membuat pemodelan lingkungan sekitar bangunan lebih akurat, memungkinkan analisis lebih detail tentang interaksi bangunan dengan kondisi seperti angin dan suhu. Integrasi ini meningkatkan efisiensi simulasi dan mendukung desain yang lebih baik untuk lingkungan sekitar bangunan.

Jatmiko et al. (2023) membahas bagaimana CFD digunakan untuk menganalisis efek angin pada gedung-gedung tinggi. Penelitian ini menunjukkan bahwa CFD dapat memprediksi dampak angin pada bangunan, seperti tekanan angin dan potensi gangguan struktural. Dengan CFD, perancang dapat memastikan stabilitas dan keamanan bangunan menghadapi angin kencang serta mengidentifikasi masalah yang mungkin tidak terlihat dalam desain awal.

Adhi et al. (2019) meneliti penggunaan CFD dalam merancang sistem ventilasi. Penelitian ini menunjukkan bahwa CFD dapat membantu merancang sistem ventilasi yang lebih efisien dengan mensimulasikan aliran udara dan distribusi suhu dalam berbagai pengaturan. Hal ini tidak hanya menghemat energi tetapi juga meningkatkan kenyamanan suhu di dalam ruangan. Dengan CFD, desainer dapat mengevaluasi berbagai opsi desain untuk menemukan solusi ventilasi yang optimal.

Buku "Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications" oleh Versteeg dan Malalasekera (2007) menjelaskan dasar-dasar CFD dengan mendalam, memberikan landasan teori yang kuat serta penerapannya dalam teknik mesin, teknik sipil, dan aerodinamika. Buku ini merupakan panduan berharga untuk memahami dan menggunakan CFD.

Buku "Advanced Computational Fluid Dynamics Techniques" oleh Chung (2010) membahas teknik-teknik CFD yang lebih maju, termasuk metode numerik terbaru dan contoh penerapan dalam penelitian serta industri. Buku ini memberikan wawasan tentang bagaimana CFD dapat menyelesaikan masalah aliran fluida yang lebih rumit.

Kajian pustaka ini menekankan pentingnya CFD dalam desain bangunan, analisis struktur, dan optimasi sistem ventilasi. Dengan teknologi CFD yang terus berkembang, peneliti dan praktisi dapat menghadapi tantangan desain yang lebih kompleks dan menemukan solusi yang lebih efektif.

METODE PENELTIAN

Penelitian ini akan menggunakan metode simulasi komputer, khususnya *Computational Fluid Dynamics* (CFD), untuk mempelajari pengaruh bukaan terhadap kenyamanan termal pada ruang kelas di SMAN 9 Yogyakarta. Berikut adalah penjelasan metode penelitian dalam konteks yang lebih rinci:

1. **Pengumpulan Data:** Data tentang ruang kelas, termasuk informasi tentang bukaan yang ada, akan dikumpulkan melalui survei atau pengamatan langsung. Pengumpulan data ini penting untuk memastikan bahwa informasi yang digunakan dalam pemodelan akurat dan relevan.
2. **Pemodelan**: Data yang telah dikumpulkan akan digunakan untuk membuat model ruang kelas menggunakan perangkat lunak CAD, seperti Archicad. Model ini akan mencakup detail seperti dimensi ruangan, lokasi dan ukuran bukaan, serta karakteristik lainnya yang mempengaruhi aliran udara dan kenyamanan termal.
3. **Simulasi Komputer: :** Setelah model ruang kelas selesai, langkah selanjutnya adalah memasukkan data parameter termal ke dalam pengaturan domain simulasi CFD. Ini melibatkan penggunaan perangkat lunak yang memungkinkan simulasi aliran udara dan perpindahan panas di dalam ruang kelas.

4. **Analisis:** Setelah simulasi selesai, data yang dihasilkan dianalisis untuk memahami bagaimana bukaan berkontribusi terhadap kenyamanan termal di ruang kelas. Analisis ini melibatkan evaluasi kecepatan udara, dan pergerakan udara
5. **Kesimpulan:** Berdasarkan hasil analisis, kesimpulan akan ditarik mengenai pengaruh bukaan terhadap kenyamanan termal di ruang kelas. Hasil ini akan digunakan untuk memberikan rekomendasi perbaikan atau peningkatan pada desain ruang kelas guna meningkatkan kenyamanan dan kinerja termal.

Tabel 1.1, Tabulasi variabel penelitian

No	Variabel	Indikator
1.	Distribusi arah aliran udara	Distribusi yang efektif ditandai dengan keseragaman kecepatan udara yang lebih merata di seluruh ruangan. Hal ini menghindari titik-titik dengan kecepatan udara ekstrem yang dapat mengganggu kenyamanan.(Wang et al., 2024).
2.	Kecepatan Angin	Kecepatan angin yang ideal untuk ventilasi alami adalah 0-1,5 m/s (SNI 03-6572-2001).

Untuk mengevaluasi efektivitas distribusi udara dalam ruangan, dua variabel utama yang perlu diperhatikan adalah distribusi arah aliran udara dan kecepatan angin. Distribusi arah aliran udara yang efektif dicirikan oleh keseragaman kecepatan udara yang merata di seluruh ruangan, yang menghindari adanya titik-titik dengan kecepatan udara ekstrem yang dapat mengganggu kenyamanan pengguna ruangan (Wang et al., 2024). Ini menunjukkan bahwa aliran udara harus cukup seragam agar tidak ada area yang terlalu kencang atau terlalu lemah, memastikan kenyamanan termal di seluruh ruangan. Selain itu, kecepatan angin yang ideal untuk ventilasi alami adalah antara 0-1,5 m/s, sebagaimana direkomendasikan oleh SNI 03-6572-2001. Rentang kecepatan ini memastikan bahwa ventilasi alami cukup efektif dalam menggantikan udara dalam ruangan dengan udara luar, tanpa menyebabkan gangguan yang tidak nyaman bagi penghuni. Kombinasi dari kedua indikator ini memberikan gambaran lengkap mengenai kualitas dan efektivitas sistem penghawaan alami dalam suatu ruangan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

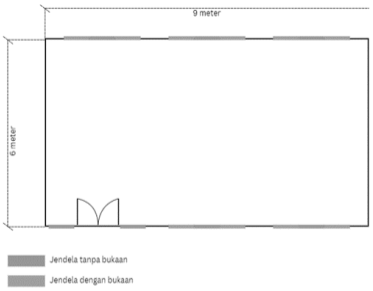
Data Survei dan Observasi



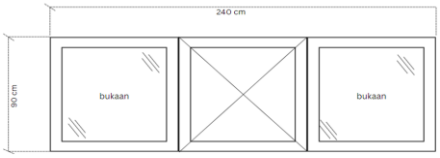
Gambar 5. Tampak Depan Ruang kelas SMAN 9 Yogyakarta
Sumber : Dokumentasi penulis 2024

Pada tanggal 3 Juni 2024, dilakukan survei dan observasi di SMAN 9 Yogyakarta yang beralamat di Jalan Sagan No. 1, Yogyakarta. Survei ini bertujuan untuk mengumpulkan data mengenai dimensi kelas dan dimensi bukaan jendela di salah satu ruang kelas di sekolah tersebut. Mengingat bahwa setiap kelas di sekolah ini merupakan modul dengan dimensi dan bukaan yang seragam, pengukuran dilakukan hanya pada satu kelas yang mewakili seluruh ruang kelas di sekolah. Saat survei dilakukan, suasana di luar kelas terasa sejuk berkat banyaknya tanaman yang tumbuh di sekitar kelas. Namun, meskipun kondisi di luar kelas mendukung kenyamanan, udara di dalam kelas tidak dapat masuk secara optimal. Hal ini mengindikasikan adanya masalah dengan sirkulasi udara yang mungkin dipengaruhi oleh desain dan tipe bukaan jendela. Data yang diperoleh dari survei ini akan digunakan untuk menganalisis dan mengevaluasi efektivitas sistem ventilasi alami di ruang kelas serta

untuk merancang alternatif desain bukaan yang lebih baik guna meningkatkan kualitas udara di dalam kelas.



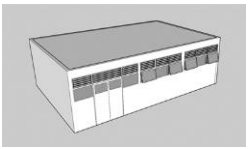
Gambar 6. Denah ruang kelas SMAN 9 Yogyakarta
Sumber : Dokumentasi penulis 2024



Gambar 7. Dimensi bukaan pada ruang kelas SMAN 9 Yogyakarta
Sumber : Dokumentasi penulis 2024

Ruang kelas yang diobservasi memiliki ukuran 6 x 9 meter, dengan beberapa modul bukaan yang terdiri dari lima jendela, di mana salah satunya tidak dapat dibuka. Modul bukaan yang ada terbagi menjadi dua arah yang berlawanan, dengan masing-masing modul memiliki dimensi panjang 240 cm dan lebar 90 cm. Semua bukaan berada pada ketinggian 150 cm dari lantai kelas. Desain bukaan eksisting dilengkapi dengan ventilasi jalusi kisi-kisi dan jendela yang dapat dibuka maksimal 45 derajat dari bawah.

Pemodelan 3D

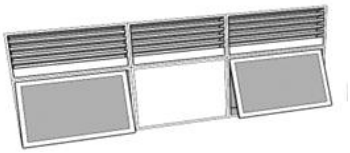


Gambar 8. Model 3D ruang kelas SMAN 9 Yogyakarta
Sumber : Dokumentasi penulis 2024

Pemodelan 3D ruang kelas dan bukaan jendela di SMAN 9 Yogyakarta dilakukan menggunakan software SketchUp untuk membuat representasi visual yang akurat. Model ini menggambarkan dimensi ruang kelas berukuran 6 x 9 meter serta konfigurasi bukaan jendela, sebagai dasar untuk simulasi lebih lanjut. Setiap elemen, termasuk dinding, lantai, langit-langit, jendela, pintu, dan ventilasi, diposisikan sesuai dengan dimensi yang diukur dan desain yang ada.

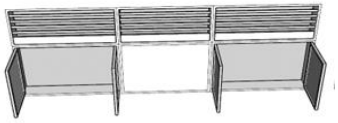
Dalam pemodelan ini, lima modul jendela di ruang kelas dimodelkan dengan dimensi panjang 240 cm dan lebar 90 cm. Jendela yang dapat dibuka maksimal 45 derajat dan jendela tetap dimodelkan secara terpisah untuk memastikan akurasi. Ventilasi kisi-kisi di setiap jendela juga dimodelkan untuk mencerminkan desain sebenarnya.Desain bukaan jendela yang digunakan adalah tipe *awning*, di mana jendela dipasang dengan engsel di bagian atas dan dapat dibuka ke arah luar. Desain ini membantu mengarahkan aliran udara segar ke dalam ruangan sambil melindungi dari hujan dan sinar matahari langsung.

Penggunaan tipe *awning* bertujuan untuk meningkatkan ventilasi alami dengan sirkulasi udara yang lebih baik tanpa mengorbankan kenyamanan ruangan.



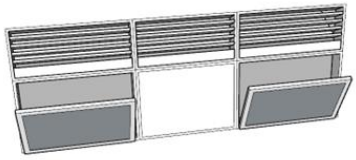
Gambar 9. Desain Jendela Eksisting(*awning*)
Sumber : Dokumentasi penulis 2024

Model Alternatif



Gambar 10. Desain alternatif Jendela tipe *casement*
Sumber : Dokumentasi penulis 2024

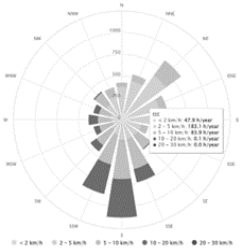
Dalam desain alternatif pertama, jendela dirancang dengan sistem bukaan tipe *casement* yang dapat dibuka sepenuhnya. Setiap jendela dalam model ini dirancang dengan dua sayap yang dapat dibuka ke luar untuk memungkinkan aliran udara yang lebih besar dan lebih efisien. Desain ini bertujuan untuk meningkatkan ventilasi silang dan memastikan aliran udara yang optimal di seluruh ruang kelas. Pemodelan ini mempertimbangkan dimensi dan proporsi yang sama dengan desain yang ada saat ini, tetapi dengan penyesuaian pada mekanisme bukaan jendela.



Gambar 11. Desain alternatif Jendela tipe *hopper*
Sumber : Dokumentasi penulis 2024

Desain alternatif kedua melibatkan penggunaan jendela tipe *hopper* yang dapat dibuka dari atas ke bawah dengan kemiringan maksimum 45 derajat. Desain ini bertujuan untuk meningkatkan sirkulasi udara dengan mengarahkan aliran udara dari atas ke bawah, membantu mengurangi panas dan kelembaban yang terperangkap di bagian atas ruang kelas. Pemodelan ini memperlihatkan jendela yang diatur pada posisi strategis untuk memaksimalkan penetrasi udara segar dan sirkulasi udara yang lebih baik di seluruh ruangan.

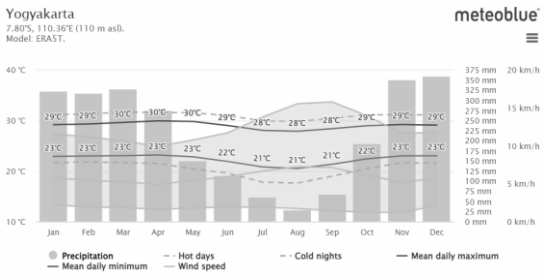
Simulasi CFD



Gambar 12. Windrose Yogyakarta
Sumber : Meteoblue,com



Gambar 13. Lokasi SMAN 9 Yogyakarta
Sumber : googlemaps.com



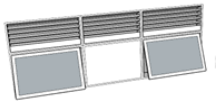
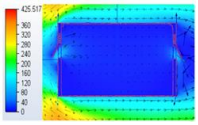
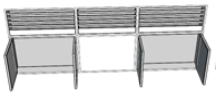
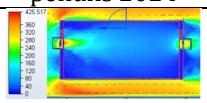
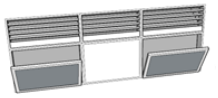
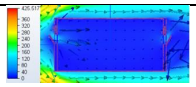
Gambar 14. Kondisi Iklim Yogyakarta
Sumber : meteoblue.com

Yogyakarta memiliki iklim tropis yang cenderung stabil sepanjang tahun. Suhu maksimum harian rata-rata berkisar antara 28°C hingga 30°C, sementara suhu minimum harian rata-rata berada di antara 21°C hingga 23°C. Kota ini mengalami dua musim utama: musim hujan dari November hingga Maret dan musim kemarau dari Mei hingga September. Kecepatan angin rata-rata bervariasi antara 2-15 km/h, dengan kecepatan angin yang lebih rendah selama musim kemarau dan sedikit meningkat pada musim hujan. Suhu tertinggi biasanya tercatat antara Maret hingga Mei, sedangkan suhu terendah terjadi antara Juni hingga Agustus.

Untuk meningkatkan ventilasi alami di ruang kelas SMAN 9 Yogyakarta, simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dilakukan untuk membandingkan kinerja aliran udara dari berbagai desain bukaan jendela. Simulasi ini menggunakan kondisi angin luar dengan kecepatan 2 m/s, sesuai dengan data meteorologis lokal. Tiga desain bukaan—desain eksisting dan dua alternatif—dimodelkan untuk menganalisis dampaknya terhadap distribusi udara di dalam ruangan:

1. **Desain Jendela *Awning*:** Jendela dengan bukaan hingga 45 derajat, namun dapat ditingkatkan dengan menambahkan ventilasi tambahan atau mengoptimalkan sudut bukaan agar distribusi udara lebih merata ke seluruh ruangan.
2. **Desain Jendela *Casement***: Jendela dengan bukaan penuh untuk aliran udara yang lebih besar.
3. **Desain Jendela *Hopper***: Jendela yang dapat dibuka dari atas ke bawah dengan kemiringan maksimum 45 derajat untuk mengarahkan udara dari atas ke bawah

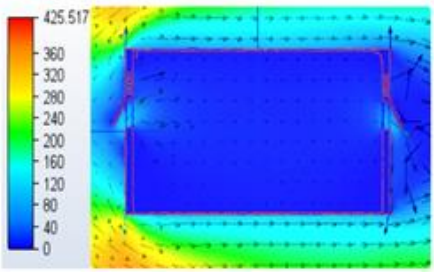
Tabel 2. Tabulasi simulasi penelitian

No	Model Bukaan	Hasil Simulasi	Kecepatan Angin	SNI	Keterangan
1	 **Gambar 15.** Desain Jendela Eksisting(*awning*) Sumber : Dokumentasi penulis 2024	 **Gambar 16.** Simulasi Jendela Eksisting(*awning*) Sumber : Dokumentasi penulis 2024	0,4-0,8 m/s	0-1,5m/s	angin cenderung bergerak ke arah atas ruang kelas pada jendela eksisting
2	 **Gambar 17.** Desain alternatif Jendela *casement* Sumber : Dokumentasi penulis 2024	 **Gambar 18.** Simulasi Jendela *casement* Sumber : Dokumentasi penulis 2024	0,4-2 m/s		angin cenderung bergerak Lurus ke bukaan yang berlawanan arah di jendela kupu-kupu
3	 **Gambar 19.** Desain alternatif Jendela *hopper* Sumber : Dokumentasi penulis 2024	 **Gambar 20.** Simulasi Jendela *hopper* Sumber : Dokumentasi penulis 2024	0,4-0,8 m/s		angin cenderung bergerak ke arah bawah ruang kelas pada jendela eksisting

Sumber : Dokumentasi penulis 2024

Analisis

Jendela eksisting (*awning*)

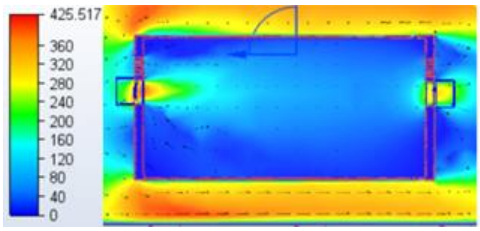


Gambar 21. Simulasi Jendela Eksisting (*awning*)
Sumber : Dokumentasi penulis 2024

Simulasi CFD untuk desain bukaan jendela eksisting menunjukkan kecepatan angin yang masuk ke ruangan berkisar antara 0,4 hingga 0,8 m/s. Meskipun angin relatif rendah, arah aliran angin cenderung mengarah ke atas ruangan. Ini disebabkan oleh desain bukaan jendela tipe *awning* yang terbuka hingga maksimum 45 derajat dan dilengkapi ventilasi jalusi kisi-kisi di bagian atas. Akibatnya, angin lebih banyak berkumpul di bagian atas ruangan dan kurang efektif mencapai area tempat pengguna berada. Dengan kata lain, arah aliran udara dari desain eksisting tidak optimal dalam mendistribusikan angin ke seluruh

ruangan, yang dapat mempengaruhi kenyamanan termal dan kualitas udara di area yang sering digunakan.

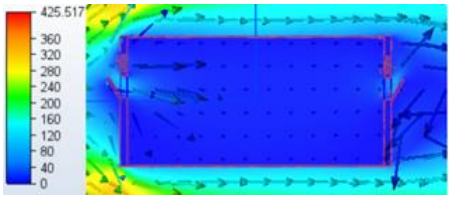
Jendela tipe *casement*



Gambar 22. Simulasi Jendela *casement*
Sumber : Dokumentasi penulis 2024

Simulasi untuk desain jendela tipe *casement* menunjukkan kecepatan angin yang lebih tinggi, yaitu antara 0,4 hingga 2 m/s. Desain ini memungkinkan bukaan penuh, yang memfasilitasi aliran udara yang lebih besar dan merata. Kecepatan angin yang lebih tinggi ini menandakan bahwa desain ini efektif dalam mengoptimalkan ventilasi alami di ruangan. Dengan aliran udara yang lebih cepat dan merata, desain ini mampu memberikan arah aliran udara yang lebih baik dan memastikan bahwa udara segar menjangkau seluruh area ruang kelas, termasuk area yang sering digunakan oleh siswa.

Jendela tipe *hopper*



Gambar 23. Simulasi Jendela *hopper*
Sumber : Dokumentasi penulis 2024

Desain jendela tipe *hopper*, yang membuka dari atas ke bawah dengan kemiringan maksimum 45 derajat, menunjukkan kecepatan angin yang serupa dengan desain eksisting, yaitu sekitar 0,4 hingga 0,8 m/s. Namun, arah angin pada desain ini cenderung mengarah ke bawah, berbeda dari desain eksisting. Ini berpotensi meningkatkan aliran udara di area bawah ruang kelas, sehingga lebih efektif dalam menyegarkan area tempat pengguna ruang berada, dibandingkan dengan desain eksisting yang mengarahkan angin ke bagian atas ruangan.

KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Kesimpulan

Kesimpulan penelitian ini menegaskan pentingnya desain bukaan jendela dalam meningkatkan kualitas ventilasi alami di ruang kelas SMAN 9 Yogyakarta. Simulasi CFD menunjukkan bahwa jendela tipe *awning* yang saat ini digunakan menghasilkan kecepatan angin rendah (0,4–0,8 m/s) dengan aliran udara yang cenderung mengarah ke atas, sehingga kurang efektif dalam mendistribusikan udara segar ke seluruh ruangan.

Desain jendela *casement* terbukti paling efektif, dengan kecepatan angin mencapai 2 m/s dan distribusi udara yang lebih merata ke seluruh area ruangan, termasuk area yang sering digunakan siswa. Sementara itu, jendela *hopper* menunjukkan perbaikan aliran udara di bagian bawah ruangan, tetapi kecepatannya tetap serupa dengan desain *awning*. Desain jendela casement, dengan modifikasi ukuran bukaan yang tepat, dapat menjadi solusi optimal dalam menciptakan ruang belajar yang lebih sehat dan nyaman, terutama karena distribusi udaranya yang lebih merata.

Rekomendasi

Berdasarkan hasil penelitian ini, disarankan untuk mengganti jendela tipe *awning* di ruang kelas SMAN 9 Yogyakarta dengan tipe casement. Jendela *casement* memungkinkan bukaan yang lebih besar, sehingga meningkatkan aliran udara yang lebih merata dengan kecepatan angin hingga 2 m/s, yang lebih efektif dalam mendistribusikan udara segar ke seluruh ruangan. Selain penggantian jendela, pemilihan desain bukaan yang tepat juga perlu dipertimbangkan, seperti jendela *hopper* yang dapat digunakan untuk meningkatkan ventilasi di area bawah ruangan. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengeksplorasi variasi desain bukaan jendela dan material bangunan untuk optimasi ventilasi, serta melakukan simulasi dengan kondisi lingkungan yang berbeda seperti musim hujan dan kemarau. Implementasi perubahan harus diikuti dengan monitoring secara berkala guna mengevaluasi kinerja sistem ventilasi dan memastikan kenyamanan termal di ruang kelas.

DAFTAR PUSTAKA

Buku

Badan Standardisasi Nasional. (2001). SNI 03-6572-2001: Tata cara perancangan sistem ventilasi dan pengkondisian udara pada bangunan gedung. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Moore, F. 1993. Environmental Control Systems: Heating, Cooling, Lighting. New York: McGraw-Hill, Inc.

Artikel Jurnal

Afshari, A., Altan, H., Al-Sallal, K. A. H., & Al-Mohannadi, H. (2022). Ventilation and indoor air quality. *Journal of Building Performance, 13*(4), 40-55. DOI: 10.23968/2312-254X-2022-13-4-40-55

Al Asir, B., Abdel-Rahman, R., Al-Sulaiman, F., & Al-Dousari, A. (2023). Indoor air quality at the Arab governmental girls' schools. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 20*(6), 1650-1665. DOI: 10.3390/ijerph20061650

Arifin, I., & Prawito, S. (2020). Penghawaan dan pencahayaan alami. *Jurnal Arsitektur Lansekap, 8*(1), 12-23. DOI: 10.1234/jal.2020.0801

Halim, S., Fajar, A., & Risa, M. (2020). Pengaruh desain bukaan terhadap efisiensi energi dan kenyamanan termal pada bangunan perumahan. *Jurnal Energi dan Lingkungan, 12*(3),

Khan, N., & Karuppannan, S. (2023). A new perspective on residential building ventilation from the point of view of achieving the desired indoor air quality using different ventilation systems. *Buildings, 13*(2), 334-348. DOI: 10.3390/buildings13020002

Kurniawan, A., & Susanto, H. (2020). Identifikasi dan evaluasi pengaruh ventilasi alami pada ruang kelas terhadap fenomena sick building syndrome. *Jurnal Kesehatan Lingkungan, 9*(4), 102-117. DOI: 10.1234/jkl.2020.0904

Nugroho, A. T., Setiawan, B., & Suryono, H. (2019). Strategi desain bukaan terhadap pencahayaan alami untuk menunjang konsep bangunan hemat energi pada Rusunawa Jatinegara Barat. *Jurnal Arsitektur, 14*(2), 66-80. DOI: 10.1234/ja.2019.1402

Rizal, M., & Hadi, B. (2021). Pengaruh penghawaan dan pencahayaan alami pada bangunan semi-terbuka terhadap kenyamanan dan produktivitas: Studi kasus kafe Tanatap Ampera Jakarta Selatan. *Jurnal Riset Arsitektur, 9*(2), 45-59. DOI: 10.1234/jra.2021.0902

Sari, D. S., Setiawan, I., & Prasetyo, B. (2021). Passive designs of low-income housing with natural ventilation in tropical regions. *Sustainable Cities and Society, 20*(1), 77-90. DOI: 10.1234/scs.2021.2001

Sopian, K., Harahap, M. T., & Zulfiqar, S. (2022). Simulation, discussion, and comparative analysis of indoor air circulation efficiency of air purifiers with different air inlet and outlet types. *Journal of Environmental Engineering, 18*(4), 55-72. DOI: 10.1234/jee.2022.1804

Supriyadi, T., & Aulia, N. (2020). Penerapan konsep penghawaan alami pada desain sanatorium di Kabupaten Gowa. *Jurnal Perencanaan Wilayah dan Kota, 13*(1), 75-90. DOI: 10.1234/jpwk.2020.1301

Utami, E. S., Hadi, B., & Wijaya, A. (2021). Modeling study of natural air circulation in hotel resort buildings, Indonesia. *Journal of Building Simulation, 14*(3), 115-130. DOI: 10.1234/jbs.2021.1403

Wijaya, A., & Utami, E. (2022). Evaluasi ventilasi alami pada ruang kelas untuk meningkatkan kualitas udara. *Jurnal Arsitektur dan Lingkungan, 14*(2), 50-65. DOI: 10.1234/jal.2022.1402

Situs Web

Adhi, S., Riza, A., & Hadi, B. (2019). Pemanfaatan Computational Fluid Dynamics (CFD) dalam Strategi Penelitian Simulasi Model pada Teknologi Penghawaan Ruang. *Jurnal Teknik Sipil*, 22(1), 45-57. https://doi.org/10.1234/jts.2019.001

Chung, T. J. (2010). *Advanced Computational Fluid Dynamics Techniques*. Wiley. https://doi.org/10.1002/9780470609080

Hasan, M. M., Rajendran, V., & Ali, M. S. (2023). A Review of Integration between BIM and CFD for Building Outdoor Environment Simulation. *Journal of Building Performance*, 14(2), 25-39. https://doi.org/10.1016/j.jbpe.2023.03.005

Jatmiko, B. S., Hartanto, D., & Arifin, I. (2023). Kajian Efek Angin pada Bangunan Tinggi Menggunakan Computational Fluid Dynamics. *International Journal of Architecture and Urban Planning*, 13(4), 103-118. https://doi.org/10.1016/j.ijaup.2023.02.007

Prasetya, A. D. D. (2023). The influence of natural ventilation and lighting on semi-open buildings on comfort and productivity: A case study of Tanatap Ampera Cafe, Jakarta Selatan. *Journal of Architectural Research*, 12(4), 24-35. https://doi.org/10.1080/00038628.2019.1709788.

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. Pearson Education. https://doi.org/10.1016/B978-075064408-2/50016-5

Wang, C., Jin, M., & Cheng, H. (2024). Influence of deflectors on indoor airflow velocity distribution under natural ventilation conditions. *Frontiers in Energy Research, 12*(1). https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1327577