
EFEKTIVITAS PENGHAWAAN ALAMI DALAM KENYAMANAN TERMAL: INTERVENSI FASAD DAN TEKNOLOGI *ECO-COOLER* PADA RUANG AULA

Dwiwangga Sang Nalendra Hadi

Jurusan Arsitektur, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia
dwiwangga.hadi@students.uii.ac.id

Supriyanta

Jurusan Arsitektur, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia
885120103@uui.ac.id

Muhammad Fahd Reyhan Wibowo

Jurusan Arsitektur, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia
18512167@students.uui.ac.id

Riwayat naskah:

Naskah diterima 18 Juli 2022

Naskah revisi akhir diterima 14 Desember 2022

ABSTRAK

Penghawaan alami menjadi solusi dalam upaya pendinginan pasif yang hemat energi. Beberapa desain dilakukan untuk menciptakan aliran udara yang memiliki kecepatan ideal agar mampu memberikan efek penyegaran yang nyaman. Asas kontinuitas fluida secara konsep memberikan efek dalam peningkatan kecepatan udara pada ujung yang lebih kecil. Teknologi *eco-cooler* dan intervensi fasad yang menggunakan asas kontinuitas ditinjau keefektifitasannya dalam peningkatan kecepatan angin dengan tujuan untuk memberikan rekomendasi bukaan guna penghawaan alami pada iklim tropis yang cenderung panas. Selain itu, penelitian juga bertujuan untuk memberikan rekomendasi sistem penghawaan alami yang mampu memberikan kenyamanan termal pada bangunan. Penelitian menggunakan metode simulasi komputerisasi dengan autodesk CFD agar didapat nilai kecepatan udara secara kuantitatif. Hasil penelitian menunjukkan asas kontinuitas berperan dalam meningkatkan kecepatan udara pada teknologi yang diusulkan. Efektivitas sistem penghawaan alami dengan asas kontinuitas terdapat pada prototipe intervensi fasad yang juga mampu memberikan kenyamanan termal pada ruang aula yang menjadi studi kasus.

KATA KUNCI: penghawaan alami, asas kontinuitas, kenyamanan termal

Natural ventilation is the solution to energy-efficient passive cooling. Several designs are carried out to create airflow that has an ideal speed in order to be able to provide a comfortable refreshing effect. The principle of fluid continuity conceptually provides an effect in increasing air velocity at the smaller end. Eco-cooler technology and facade interventions that use the principle of continuity are reviewed for their effectiveness in increasing wind speed with the aim of providing recommendations for openings for natural ventilation in tropical climates that tend to be hot. In addition, the research also aims to provide recommendations for natural air conditioning systems that are able to provide thermal comfort in buildings. The research uses a computerized simulation method with Autodesk CFD to obtain quantitative air velocity values. The results showed that the continuity principle plays a role in increasing air velocity in the proposed technology. The effectiveness of the natural ventilation system with the principle of continuity is found in the prototype facade intervention which is also able to provide thermal comfort in the hall space which is a case study.

KEYWORDS: continuity principle, natural ventilation, thermal comfort

PENDAHULUAN

Penghawaan alami dikategorikan sebagai salah satu upaya pendinginan pasif yang paling efektif, khususnya dalam menghadapi iklim panas yang membutuhkan upaya pendinginan guna mendapatkan kondisi termal yang nyaman bagi penghuni gedung serta lingkungan dalam ruangan yang sehat (Omrani et al., 2017, p. 1). Penghawaan alami dilaporkan mampu menghemat 30% sampai 40% konsumsi energi dibandingkan bangunan yang menggunakan penghawaan mekanis (Schulze & Eicker, 2013, p. 222). Desain penghawaan alami, memiliki kendala tertentu berupa kompleksnya aliran udara serta turbulensi di sekitar dan dalam bangunan, khususnya di daerah urban yang padat (Omrani et al., 2017, p. 1). Performa

penghawaan alami dipengaruhi oleh berbagai macam desain sistem yang berbeda seperti pemilihan mode penghawaan, baik penghawaan satu sisi maupun penghawaan silang, rasio jendela terhadap dinding, jenis bukaan, dan luas lantai. Dalam berbagai parameter tersebut, mode pemilihan jenis penghawaan memiliki dampak terbesar pada tingkat penghawaan bangunan (Fung & Lee, 2015, p. 1). Studi Omrani et al. (2017) menemukan bahwa ventilasi silang lebih efektif dalam mencapai kenyamanan termal suatu ruangan daripada ventilasi satu sisi sebagaimana yang telah diuji.

Berdasarkan kajian tersebut, peneliti menguji keefektifitasan sistem penghawaan alami dengan memilih mode ventilasi silang sebagaimana yang direkomendasikan oleh Omrani et al. (2017). Sebagai

kebaruan, mode tersebut diuji keefektifitasannya menggunakan teori asas kontinuitas pada fisika. Dalam fluida dinamis, persamaan kontinuitas menjelaskan bahwa debit fluida pada setiap titik memiliki nilai yang sama atau konstan (Shidqi & Anggaryani, 2020, p. 135). Namun, persamaan kontinuitas juga menilai bahwa kecepatan suatu fluida akan semakin cepat pada luas area yang kecil sebagai upaya memenuhi nilai debit yang konstan. Secara matematis asas kontinuitas dirumuskan sebagai berikut:

$$Q_1 = Q_2 \dots \dots \dots (1)$$

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \dots \dots \dots (2)$$

Q1 = Debit fluida pada penampang pertama (m^3 / s)

Q2 = Debit fluida pada penampang kedua (m^3 / s)

A1 = Luas penampang pertama (m^2)

A2 = Luas penampang kedua (m^2)

v1 = Kelajuan fluida pada penampang pertama (m/s)

v2 = Kelajuan fluida pada penampang kedua (m/s)

Prinsip asas kontinuitas pernah diterapkan pada teknologi penghawaan alami sederhana dari botol plastik bekas bernama *eco-cooler* yang dikembangkan oleh Ashis Paul (Huq, 2016). Secara khusus teknologi ini pernah ditinjau menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) oleh Kasantikul (2020) dan sukses dalam menurunkan suhu ruangan. Kajian *eco-cooler* dengan CFD juga pernah ditinjau oleh Hadi et al. (2022) yang sukses membuat suatu ruang aula mencapai kenyamanan termal melalui intervensi kecepatan angin sebagai salah satu parameternya. Prinsip dalam intervensi luasan penampang *inlet* dan *outlet* menjadi kesuksesan *eco-cooler* dalam meningkatkan kecepatan angin. Hal ini sejalan dengan tinjauan Bhanuprakash et al. (2018) yang menyimpulkan bahwa penggunaan *inlet* botol berdiameter 4 inci dan *outlet* 1 inci pada *eco-cooler* akan menghasilkan pengurangan suhu pada ruangan lebih baik (Bhanuprakash et al., 2018, p. 6).

Kajian ini mencoba menerapkan keberhasilan prinsip kontinuitas fisika dalam peningkatan kecepatan angin guna intervensi kenyamanan termal. Sebagaimana Omrani et al. (2017) meninjau bahwa mode ventilasi silang lebih efektif dalam penghawaan alami, peneliti menggunakan mode tersebut dalam mengintervensi ruangan yang memiliki isu kenyamanan termal di bawah standar. Penelitian ini menggunakan dua model dalam menguji keefektifitasan prinsip kontinuitas, yaitu intervensi model fasad secara langsung dan teknologi *eco-cooler*. Dari hal tersebut, dirumuskan pertanyaan penelitian untuk dikaji berupa:

1. Manakah model sistem penghawaan alami berbasis kontinuitas yang lebih efektif?
2. Bagaimana kenyamanan termal dapat terbangun dengan model penghawaan alami yang diusulkan?

Penelitian bertujuan untuk menemukan sistem penghawaan alami yang efektif pada ruangan yang memiliki tingkat kenyamanan termal di bawah standar akibat suhu rata-rata panas dengan intervensi kecepatan angin. Pengujian asas kontinuitas diharapkan mampu memberikan rekomendasi tipe bukaan pada bangunan di daerah tropis. Rekomendasi yang dimaksud berupa sistem penghawaan alami melalui tipe bukaan yang mampu memberikan kenyamanan termal dalam ruang.

Pengujian efektivitas prinsip kontinuitas dalam penghawaan alami menggunakan analisis komputerisasi dengan autodesk CFD yang mampu menganalisis aliran fluida. Angin sebagai fluida ditinjau untuk ditemukan penyebarannya dalam ruangan dan kecepatannya saat dilakukan intervensi dengan model yang akan diuji. Agar pengujian kenyamanan termal dapat lebih terukur, digunakan studi kasus pada aula SMA N 1 Magelang yang pernah ditinjau oleh Hadi et al. (2022) memiliki kenyamanan termal di bawah standar.

KAJIAN PUSTAKA

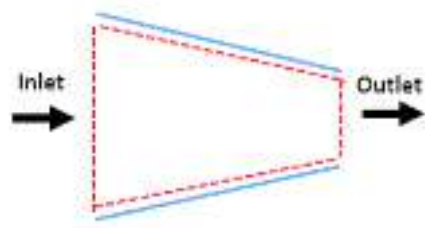
Kecepatan Angin sebagai Upaya Intervensi Kenyamanan Termal

Suatu wilayah yang memiliki iklim tropis lembap dapat menggunakan intervensi dari hembusan angin yang menyentuh kulit tubuh untuk meningkatkan kenyamanan termal. Rasa kenyamanan tersebut didapat dari proses terjadinya evaporasi keringat melalui hembusan angin (Sangkertadi dalam Pratiwi & Arifin, 2021, p. 2). Kecepatan angin juga ditinjau sebagai salah faktor pembangun kenyamanan termal dalam suatu ruang menurut parameter Ashrae-55. Secara rinci kenyamanan termal dapat terbangun melalui parameter Ashrae-55 yang berupa tingkat metabolisme dan insulasi pada pakaian (faktor personal); temperatur udara, kecepatan angin, temperatur rata-rata radiasi, dan kelembapan relatif.

Suatu desain yang menyebabkan radiasi sinar matahari menjadi tinggi, sirkulasi udara yang memiliki kecepatan angin kecil, tingginya tingkat kelembapan udara membuat sulitnya mencapai kenyamanan termal (Roonak et al. dalam Santoso, 2012, p. 15). Kecepatan angin dalam sistem penghawaan alami diatur agar nyaman bagi pengguna. Lippsmeier (1997) mengategorisasikan kecepatan angin yang nyaman dalam empat kategori, yaitu: (1) < 0.25 m/s adalah nyaman, gerakan angin tidak terasa; (2) $0.25 - 0.5$ m/s adalah nyaman, gerakan angin terasa; (3) $1.0 - 1.5$ m/s gerakan angin terasa ringan sampai tidak menyenangkan; (4) di atas 1.5 m/s gerakan angin terasa tidak menyenangkan (Lippsmeier dalam Munawaroh & Elbes, 2019, p. 86).

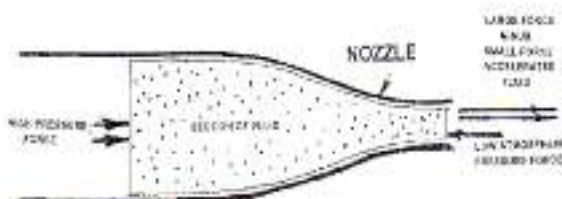
Penerapan Asas Kontinuitas dan *Eco-cooler*

Sebagaimana rumus asas kontinuitas yang menjelaskan bahwa terjadi kenaikan kecepatan fluida pada luas area yang kecil sebagai upaya menyeimbangkan nilai debit yang konstan pada setiap area, dalam hal ini asas tersebut juga digunakan pada nozel. Nozel merupakan alat yang berfungsi dalam mengontrol arah atau karakteristik aliran suatu fluida, khususnya dalam meningkatkan kecepatan (Kasantikul, 2020, p. 69). Prinsip suatu nozel pada dasarnya meningkatkan kecepatan fluida dengan mengorbankan energi tekanannya (Sonntag dalam Kasantikul, 2020, p. 69).



Gambar 1. Prinsip kerja nozel dengan asas kontinuitas (Sumber: Kasantikul, 2020)

Asas kontinuitas dalam teknologi penghawaan alami digunakan pula pada prinsip kerja *eco-cooler*. Ujung terbuka dari bagian luar dengan luas area yang lebih lebar daripada dalamnya membuat teknologi ini tidak membawa radiasi sinar matahari yang panas ke dalam ruangan (Bhanuprakash et al., 2018, p. 3). Namun, udara yang masuk ke bagian botol dan melewati leher botol yang semakin kecil membuat udara akan terkompresi. Kompresi tersebut memperbesar kecepatan udara dengan cara mengurangi tekanannya. Akibat terdapatnya udara yang terkompresi, membuat desakan untuk keluar dari botol *eco-cooler* semakin besar. Desakan tersebut membuat tekanan rendah yang mampu menarik udara di sekitar ke dalam teknologi *eco-cooler* (Bhanuprakash et al., 2018, p. 3).



Gambar 2. Prinsip kerja teknologi *eco-cooler* dari botol plastik yang dibelah (Sumber: Bhanuprakash et al., 2018)

METODE PENELITIAN

Metode Pengumpulan Data

Data diperoleh dengan pengukuran langsung di lapangan objek studi kasus, yaitu Aula SMA N 1 Magelang dimana data suhu dan kelembapan pernah diukur dengan termometer HTC-2 oleh Hadi et al. (2022). Data pendukung berupa potensi angin didapat peneliti dari windrose yang berasal dari meteoblue.com dimana arah angin terbesar dari arah selatan dengan kecepatan 4.1667 m/s (meteoblue, 2022). Observasi digunakan pula untuk mengetahui tipe dan jenis bukaan pada aula sehingga evaluasi *existing* selain didasarkan pada data suhu dan kelembapan juga dapat didasarkan pada evaluasi komputerisasi berkaitan dengan kecenderungan kecepatan angin pada bangunan.

Metode Analisis Data

Menggunakan metode kuantitatif dengan hasil terukur yang didapatkan dari simulasi komputer. *Software* yang digunakan dalam melakukan simulasi komputerisasi mampu merepresentasikan fakta yang mendekati keadaan sebenarnya (Lapenangga, 2014). Dari hal tersebut, keobjektifan penelitian dapat lebih tercapai karena tidak didasarkan pada persepsi manusia, melainkan pada data yang diuji keabsahannya dengan simulasi komputer.

Dalam meninjau keefektifitasan asas kontinuitas pada penghawaan alami, peneliti menggunakan dua model yang merepresentasikan penerapan asas tersebut dalam mode penghawaan silang. Pertama, peneliti melakukan intervensi fasad dimana fasad dilakukan pemodelan seperti corong dengan aliran *outlet* yang semakin mengecil. Kedua, peneliti menggunakan teknologi *eco-cooler* dalam mengintervensi bukaan. Ukuran dari kedua model tersebut disesuaikan dengan perbandingan *inlet* 4: *outlet* 1 sebagaimana yang pernah dikaji Bhanuprakash (2018) efektif dalam pengurangan suhu ruangan. Dari kedua model tersebut, peneliti meninjau model manakah yang mampu meningkatkan kecepatan angin dan membantu tercapainya kenyamanan termal dalam ruangan.

Pengujian dilakukan dengan *modelling prototype* yang mewakili tempat studi kasus. *Software autodesk CFD* digunakan untuk menemukan data secara kuantitatif mengenai kecepatan angin sebelum dan setelah melewati dimensi bukaan yang lebih kecil. Data tersebut digunakan untuk melihat peningkatan kecepatan udara serta berguna dalam menganalisis model manakah yang lebih efektif dalam membangun kenyamanan termal pada ruangan aula studi kasus.

Kenyamanan termal diuji menggunakan *software* CBE Berkeley edu. Kemampuan *software* tersebut dipakai dalam mengetahui kenyamanan termal secara

terukur dan digital (Tartarini et al., 2020). Menggunakan parameter Ashrae-55, kecepatan angin ditinjau sebagai parameter utama dalam meninjau kemampuan *prototype* dalam mengintervensi kenyamanan termal.

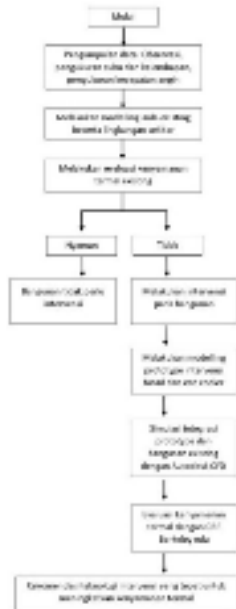


Diagram 1. Alur penelitian (Sumber: Dokumentasi penulis, 2022)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Evaluasi Kenyamanan Termal Aula SMAN 1 Magelang
 Dalam observasi yang dilakukan, ruangan aula dengan luas 164 m² memiliki bukaan pada fasad barat dan timurnya saja. Bukaan menggunakan 36% luasan dinding barat dan 35% timur. Namun, potensi bukaan tersebut diabaikan karena jendela menggunakan *fixed glass window* sehingga tidak terdapat aliran udara yang masuk. Aliran udara hanya dapat masuk melalui bukaan pintu seluas 4 m² pada bagian barat dan 8 m² di timur. Peninjauan kenyamanan termal dilakukan Hadi et al. (2022) dengan alat ukur termometer HTC-2 untuk mengetahui kelembapan dan suhu ruang sebagai parameter kenyamanan termal.



Gambar 3. Denah aula dan peletakan alat ukur HTC-2 (Sumber: Hadi et al., 2022)

Tabel 1. Hasil pengukuran suhu dan kelembapan ruangan dengan HTC-2 pada kedua titik

Titik Ukur	Tanggal	Suhu (°C)	Kelembapan (%)	Suhu Maksimum Terukur (°C)	Suhu Minimum Terukur (°C)	RH Maksimum Terukur (%)	RH Minimum Terukur (%)
1	08.00	28,7	62	30	22,0	60	51
	17.00	27	55				
2	08.00	26,5	55	28,4	25,1	72	60
	17.00	28,9	55				

(Sumber: Hadi et al., 2022)

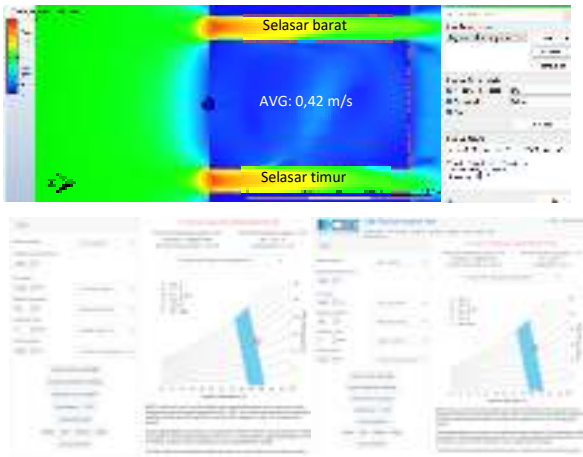


Gambar 4. Pengujian titik satu (kiri) dan dua (kanan) dengan suhu tertinggi menyimpulkan ruang tidak nyaman secara termal

(Sumber: CBE Berkeley University of California, 2022)

Dari hasil uji menggunakan tools CBE Berkeley edu yang menggunakan parameter Ashrae-55, kondisi kenyamanan termal pada aula tidak nyaman, terlebih saat siang hingga sore hari dengan kondisi bukaan pintu ditutup. Guna memperbaiki hal tersebut, angin sebagai potensi lingkungan sekitar dapat dijadikan intervensi untuk memperbaiki kenyamanan termal. Berdasarkan data dari meteoblue.com, terdapat potensi angin terbesar dari arah selatan dengan kecepatan 4.1667 m/s. Namun, fasad selatan berupa dinding masif sehingga perlu dilakukan intervensi. Bukaan yang sejajar arah angin menyebabkan angin akan bergerak lurus serta tidak berputar di ruangan sehingga perlu dihindari dengan membuat bukaan yang tegak lurus dengan arah angin (Gunawan & Wijaya, 2019, p. 500). Dari hal tersebut fasad barat dan timur memiliki potensi minim jika diintervensi karena akan sejajar arah angin. Oleh karena itu, perlu dilakukan intervensi pada fasad selatan dan utara agar potensi angin dapat lebih optimum.

Aula memiliki potensi bukaan pada pintu yang terletak di fasad barat dan timurnya. Dalam mengevaluasi kenyamanan termal *existing*, dilakukan pula pemodelan ruang aula dengan pintu pada kedua fasad dibuka maksimum sebagai alur penghawaan alami. Pengujian dilakukan dengan CFD untuk melihat rata-rata kecepatan angin yang masuk jika pintu aula dibuka maksimum. Kecepatan angin digunakan untuk meninjau kenyamanan termal yang dicapai jika ruangan memaksimalkan bukaan pintu.

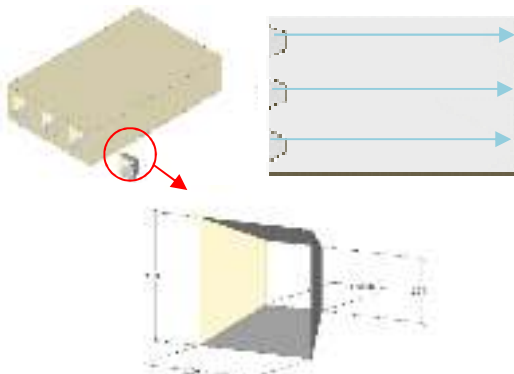


Gambar 5. Pengujian kecepatan angin yang masuk (atas) dan kenyamanan termal yang tercapai (bawah) (Sumber: CBE Berkeley University of California dan Dokumentasi penulis, 2022)

Berdasarkan pengujian dengan CFD, penghawaan alami dengan bukaan pintu maksimum mampu memberikan kecepatan angin rata-rata 0,42 m/s pada ruang aula. Meskipun terdapat kecepatan angin yang tergolong nyaman dan terasa, pengujian kenyamanan termal dengan CBE menunjukkan intervensi tersebut belum mampu memenuhi standar. Selain itu, penggunaan aula pada aktivitas tertentu memerlukan privasi sehingga pintu perlu ditutup. Dalam hal ini intervensi fasad utara dan selatan menjadi rekomendasi dalam memperbaiki kondisi termal bangunan dengan sistem penghawaan alami sekaligus meningkatkan fungsionalitas aula ketika digunakan yang membutuhkan privasi dari lingkungan sekitar. Intervensi fasad dengan penerapan konsep asas kontinuitas dan teknologi *eco-cooler* menjadi dua hal yang akan ditinjau sebagai alternatif.

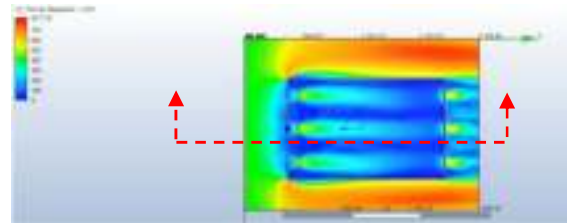
Simulasi Keefektifitasan Prinsip Kontinuitas dalam Mode Penghawaan Alami

1. Intervensi Fasad

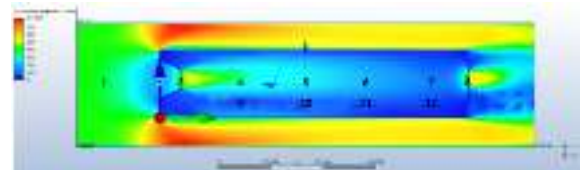


Gambar 6. *Prototype* intervensi fasad dengan perbandingan 4:1 antara *inlet* dan *outlet*-nya (Sumber: Dokumentasi penulis, 2022)

Fasad selatan dan utara dilakukan intervensi dimana teknologi berbentuk corong yang menerapkan asas kontinuitas diletakkan pada fasad selatan yang difungsikan sebagai *inlet*. Kedua fasad tersebut menjadi bentuk penerapan ventilasi silang. Keefektifitasan penghawaan alami ditinjau berdasarkan pergerakan udara dan kecepatannya dalam ruangan. Penerapan asas kontinuitas yang terdapat pada fasad selatan dibuktikan dengan peninjauan kecepatan angin pada bagian *inlet* dengan ukuran 4 m² dan *outlet* 1 m² (4:1). Fasad utara menjadi aliran *outlet* menuju keluar bangunan dengan ukuran 1 m² dan sejajar dengan *inlet* pada fasad selatan.



Gambar 7. Hasil pengujian denah aula dengan Autodesk CFD. (Sumber: Dokumentasi penulis, 2022)



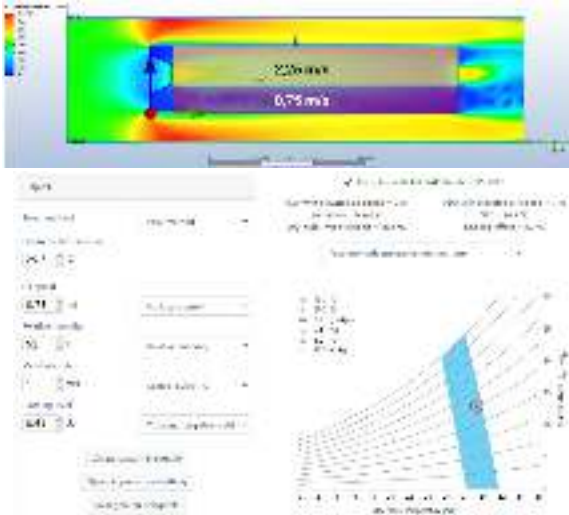
Gambar 7. Hasil pengujian potongan aula dengan Autodesk CFD (Sumber: Dokumentasi penulis, 2022)

Pada ilustrasi potongan (gambar 7) menunjukkan titik 1-8 sebagai aliran angin bagian atas (> 2m) sedangkan 9-12 sebagai titik dimana aliran angin mengenai pengguna (<2m). Hasil pengujian menunjukkan prinsip dalam asas kontinuitas sukses menciptakan kecepatan angin yang lebih cepat pada lubang ventilasi *inlet*. Aliran angin linear dengan bukaan sehingga arus terbesar terletak 2 meter dari lantai (agar tidak mengganggu level pengguna). Angin juga menyebar pada ruang-ruang lain pada aula dengan kecepatan yang lebih rendah, tetapi gerakan angin terasa ringan.

Tabel 2. Data pengukuran kecepatan angin (m/s) pada aula setelah intervensi pada fasad

Titik	Kecepatan Angin
1	4,22
2	1,54
3	4,22
4	2,14
5	2,28
6	1,37
7	1,32
8	2,64
9	0,82
10	1,38
11	0,99
12	0,88

(Sumber: Dokumentasi penulis, 2022)

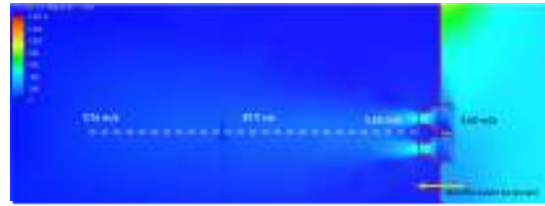


Gambar 9. Rata-rata kecepatan angin pada area atas (>2m) dan bawah (<2m). Hasil pengujian kenyamanan termal pada area bawah (aktivitas manusia) dengan intervensi kecepatan angin 0,75 m/s dan data suhu terpanas berdasarkan pengukuran.
(Sumber: Dokumentasi penulis dalam Autodesk CFD dan CBE Berkeley edu, 2022)

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kenyamanan termal dapat tercapai di dalam ruangan. Kecepatan angin pada level pengguna <2 m masih tergolong nyaman karena memiliki kecepatan <1,5 m/s. Kecepatan pada bagian atas >2 m mampu membuat ruangan lebih nyaman secara termal karena menghasilkan kecepatan angin yang lebih besar. Namun, rata-rata kecepatan 2,25 m/s dikategorisasikan sebagai kecepatan angin yang tidak nyaman sehingga rekomendasi bukaan yang tidak diarahkan pada level pengguna secara langsung menjadi strategi yang tepat dalam intervensi fasad.

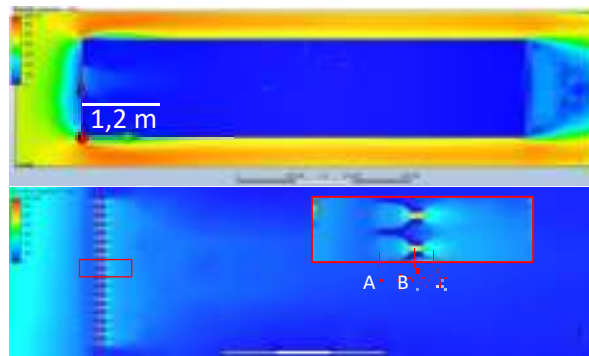
2. Intervensi Teknologi Eco-Cooler

Eco-cooler secara sederhana berupa botol plastik yang dibelah dua dan bagian yang dekat dengan ujung botol yang kecil dimanfaatkan sebagai aliran *outlet* angin pada teknologinya. Berdasarkan asas kontinuitas, ujung yang kecil tersebut mampu meningkatkan kecepatan udara. Hadi et al. (2022) melakukan pengujian keefektifitasan teknologi tersebut dengan melakukan *prototyping*. Pada pengujiannya ditemukan bahwa terjadi peningkatan kecepatan udara pada botol *eco-cooler* yang dipasang sehingga sejalan dengan prinsip asas kontinuitas.



Gambar 8. Hasil simulasi dengan autodesk CFD ditemukan terjadi peningkatan kecepatan angin dari teknologi *eco-cooler* (dari 3,60 m/s menjadi 5,20 m/s)
(Sumber: Hadi et al., 2022)

Penelitian Hadi et al. (2022) lebih memfokuskan pada konfigurasi *up-down cross ventilation* antara fasad selatan dan barat serta timur. Pada kajian ini, peninjauan difokuskan pada sistem *cross ventilation* pada fasad selatan dan utara agar arah angin terfokus pada satu arah. Teknologi *eco-cooler* yang pernah dikaji oleh Hadi et al. (2022) mampu memberikan kecepatan angin sebesar 0,76 m/s dalam jarak dari *inlet* sejauh 85 cm. Penelitian ini menguji kembali *prototype eco cooler* dan ditemukan terdapat ketidakefektifan penggunaan teknologi tersebut jika diterapkan. Menggunakan model botol dengan bagian badan berdiameter 4 inchi dan leher 1 inchi (4:1) sebagaimana yang direkomendasikan Bhanuprakash (2018), *eco-cooler* disusun pada lubang ventilasi berukuran 1 m². Dari hasil pengujian ditemukan bahwa *eco-cooler* yang dipasang dengan luasan tersebut hanya efektif pada jarak pendek.



Gambar 10. Pengujian teknologi *eco cooler* dalam potongan bangunan (atas) detail pengujian teknologi sebagai aliran *inlet* bangunan (bawah)
(Sumber: Dokumentasi penulis, 2022)

Kecepatan angin dari luar terlihat semakin melambat ketika memasuki rangkaian *eco-cooler* pada bukaan. Setelah angin memasuki badan botol (A) kecepatan angin mulai meningkat dimana terlihat terdapat desakan angin untuk keluar menuju leher botol (B). Pada bagian leher botol terdapat peningkatan kecepatan angin tertinggi yang kemudian keluar ke dalam ruangan dan menyebar (C).

Tabel 3. Data pengukuran kecepatan angin (cm/s) pada 17 titik *eco-cooler* yang diintegrasikan pada bukaan seluas 1 m²

Titik	Inlet (Dudukan botol)	Outlet (Leher botol)	Outlet ke ruangan
1	66,48	515,21	257,6
2	88,79	488,88	259,15
3	96,5	521,38	304,6
4	88,28	483,88	246,88
5	88,28	542,24	253,81
6	88,52	542,24	242,18
7	84,22	542,24	247,88
8	84,63	483,78	232,81
9	88,27	528,28	251,87
10	84,23	483,25	237,88
11	84,87	483,6	241,48
12	86,0	506,6	270,1
13	86,7	488,43	253,6
14	88,87	478,88	238,88
15	87,2	483,78	270,7
16	88,58	488,47	246,77
17	88,48	482,28	283,87
RATA-RATA	86,11348113	488,4848113	248,01348113

(Sumber: Dokumentasi penulis, 2022)

Teknologi *eco-cooler* mampu memberikan perubahan kecepatan udara yang signifikan antara badan botol sebagai *inlet* dan leher botol sebagai *outlet* (terdapat selisih 4,10 m/s). Angin yang dikeluarkan ke dalam ruangan (*outlet* ke ruangan) dikategorikan cukup besar karena >1,5 m/s, tetapi hanya bertahan pada jarak yang pendek ±18 cm dan semakin kecil hingga pengaruhnya bertahan sampai jarak 1,2 m. Pada bagian dalam aula, khususnya yang digunakan untuk aktivitas, rata-rata kecepatan angin hanya 0,13 m/s (mengalami penurunan signifikan). Hal ini menjadi bukti bahwa teknologi *eco-cooler* tidak efektif digunakan dalam menjangkau bangunan dengan tipe aula yang memiliki ruang yang besar.

Mengambil rata-rata kecepatan udara pada bagian tengah bangunan yang memiliki kecepatan rata-rata 0,13 m/s, pengujian kenyamanan termal dilakukan dengan CBE Berkeley Edu. Ditemukan kecepatan tersebut belum mampu memberikan kenyamanan termal.



Gambar 11. Pengujian kenyamanan termal teknologi *eco-cooler* dalam penghawaan alami *cross ventilation* fasad selatan dan utara. Ruangannya tidak mencapai kenyamanan termal.

(Sumber: CBE Berkeley edu, 2022)

Komparasi Efektivitas Teknologi Berasas Kontinuitas

Intervensi fasad secara langsung memberikan peningkatan kecepatan udara secara signifikan pada teknologi corong yang diusulkan (1,58 menjadi 4,55 m/s). Kecepatan udara pada bagian depan cenderung tidak nyaman karena memiliki kecepatan lebih dari 1,5 m/s. Bukaan dapat diarahkan menuju bagian atas agar terjadi reduksi kecepatan angin sehingga level pengguna mendapatkan angin dengan kecepatan yang lebih rendah. Berdasarkan hasil tinjauan dengan tools CBE Berkeley Edu, teknologi ini mampu memberikan ruang aula kenyamanan termal sekaligus menghasilkan rata-rata kecepatan angin yang nyaman (0,75 m/s) pada level pengguna.

Eco-cooler karena membagi kecepatan udara pada unit-unitnya, terjadi keefektifitasan percepatan udara pada jarak yang pendek. Terdapat peningkatan kecepatan udara secara signifikan pada unit *eco-cooler* antara bagian badan dengan lehernya (0,86 menjadi 4,96 m/s), tetapi tidak efektif dalam menjangkau jarak ruangan yang dalam. Dalam uji dengan tools CBE Berkeley Edu, teknologi tersebut tidak efektif dalam memberikan kenyamanan termal karena kecepatan udara yang dihasilkan pada bagian pengguna sangat kecil (0,13 m/s).

Secara ringkas, teknologi *eco cooler* memberikan peningkatan kecepatan angin paling besar (+4,10 m/s) daripada intervensi fasad secara langsung (+2,97 m/s). Namun, jangkauan angin pada *eco-cooler* sangat pendek sehingga pengaruh peningkatan kecepatan anginnya tidak signifikan yang berdampak pada tidak tercapainya kenyamanan termal. Hal ini berbanding terbalik dengan intervensi fasad secara langsung, dimana teknologi tersebut mampu memberikan kenyamanan termal dalam ruangan melalui kecepatan angin yang dihasilkan.

KESIMPULAN

Aula SMA N 1 Magelang memiliki kondisi yang tidak nyaman secara termal. Meskipun intervensi dengan membuka pintu secara maksimum pada fasad barat dan timur mendekati kenyamanan termal, masalah privasi dan fungsionalitas aula akan terganggu jika hal tersebut dilakukan. Pengujian dilakukan dengan kondisi aula tertutup sebagaimana keadaan *existing*. Intervensi fasad dan teknologi *eco-cooler* dilakukan untuk meninjau upaya yang tepat dalam mencapai kenyamanan termal melalui penghawaan alami.

Asas kontinuitas memiliki peran dalam meningkatkan kecepatan angin pada teknologi penghawaan alami yang diusulkan. Berdasarkan pengujian menggunakan autodesk CFD ditemukan terdapat kenaikan kecepatan angin sebelum dan sesudah memasuki teknologi dimana terdapat peningkatan sebesar 2,97 m/s pada intervensi fasad

dan 4,10 m/s pada teknologi *eco-cooler*. Berdasarkan pengujian tersebut, teknologi *eco cooler* memiliki nilai peningkatan kecepatan yang lebih tinggi. Namun, jangkauan dari *eco-cooler* tidak sepanjang intervensi fasad secara langsung sehingga penurunan kecepatan angin terjadi secara signifikan pada jarak optimumnya ($\pm 1,2$ meter). Dalam hal tersebut penelitian menemukan bahwa:

- Efektivitas teknologi penghawaan alami dalam pengujian terdapat pada intervensi fasad secara langsung yang memberikan jangkauan penghawaan alami lebih panjang sehingga bagian dalam ruangan mendapat kecepatan angin yang cukup.
- Kecepatan angin sebagai salah satu parameter kenyamanan termal menurut Ashrae-55 mampu memberikan intervensi termal yang memadai. Pada model intervensi fasad, dengan kecepatan rata-rata pada ruangan dalam sebesar 0,75 m/s, kenyamanan termal dapat dicapai (berdasarkan data pengukuran suhu dan kelembapan *existing* yang tidak nyaman secara termal). Kecepatan angin pada level pengguna yang dicapai intervensi fasad juga tergolong nyaman karena <1,5 m/s sehingga tidak mengganggu pengguna.

Berdasarkan simpulan tersebut, intervensi fasad selatan dengan teknologi corong direkomendasikan sebagai sistem penghawaan alami yang mampu memberikan kecepatan udara yang nyaman dan memberikan kenyamanan termal pada pengguna aula. Teknologi *eco-cooler* memiliki potensi sebagai sistem penghawaan alami yang efektif dalam jarak pendek sehingga diperlukan intervensi kembali dalam penggunaannya.

DAFTAR PUSTAKA

- Bhanuprakash, C., Mummina, V., & Mahesh Chakravarthi, V. (2018). Performance Evaluation of an Eco-Cooler analysed by varying the Physical and flow Parameters. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 377(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/377/1/012024>
- Fung, Y. W., & Lee, W. L. (2015). Identifying the most influential parameter affecting natural ventilation performance in high-rise high-density residential buildings. *Indoor and Built Environment*, 24(6), 803–812. <https://doi.org/10.1177/1420326X14536189>
- Gunawan, T. Y., & Wijaya, A. (2019). Fasilitas Olahraga Di Jombang. *Edimensi Arsitektur*, 7(1), 497–504.
- Hadi, D. S. N., Supriyanta, & Rachmadi, R. A. D. (2022). Efektivitas Eco-Cooler Dalam Perbaikan Kondisi Termal Bangunan Dengan Sistem Penghawaan Alami Yang Sustainable Dan Sehat (Studi Kasus: Aula SMA N 1 Magelang). *Seminar Karya Dan Pameran Arsitektur Indonesia (Sakapari)*.
- Huq, J. (2016). *How Bangladeshi inventors are making eco-friendly air conditioners from plastic bottles*. <https://observers.france24.com/en/20160602-bangladesh-air-conditioner-plastic-bottles-technology>
- Kasantikul, B. (2020). Eco-cooler Analysis for Room Temperature Reduction. In *Mahasarakham International Journal Of Engineering Technology* (Vol. 6, Issue 2).
- Lapenangga, A. K. (2014). *Kajian Kenyamanan Termal Dan Kualitas Kesehatan Dalam Arsitektur Tradisional Masyarakat Adat 'Boti'kab. Timor Tengah Selatan*.
- Meteoblue. (2022). *Wind Rose 7.48°S 110.21°E*. <https://www.meteoblue.com/en/weather/archive/windrose/-7.483N110.214E>
- Munawaroh, A. S., & Elbes, R. (2019). Penilaian kenyamanan termal pada bangunan perpustakaan Universitas Bandar Lampung. *ARTEKS : Jurnal Teknik Arsitektur*, 4(1), 85–98. <https://doi.org/10.30822/arteks.v4i1.83>
- Omrani, S., Garcia-Hansen, V., Capra, B. R., & Drogemuller, R. (2017). Effect of natural ventilation mode on thermal comfort and ventilation performance: Full-scale measurement. *Energy and Buildings*, 156, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.061>
- Pratiwi, N., & Arifin, S. S. (2021). Analisis Performa Model Eco-Cooler Sebagai Alternatif Bukaam Alami. *Nature: National Academic Journal of Architecture*, 8(1), 1. <https://doi.org/10.24252/nature.v8i1a1>
- Santoso, E. I. (2012). Kenyamanan Termal Indoor Pada Bangunan Di Daerah Beriklim Tropis Lembab. *Indonesian Green Technology Journal*, 1(1), 13–19.
- Schulze, T., & Eicker, U. (2013). Controlled natural ventilation for energy efficient buildings. *Energy and Buildings*, 56, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.044>
- Shidqi, M. I. M., & Anggaryani, M. (2020). Pengembangan Alat Peraga Berbasis Sensor Flowmeter Untuk Menerapkan Persamaan Kontinuitas Pada Materi Fluida Dinamis. *IPF: Inovasi Pendidikan Fisika*, 09(02), 133–143.
- Tartarini, F., Schiavon, S., Cheung, T., & Hoyt, T. (2020). CBE Thermal Comfort Tool: Online tool for thermal comfort calculations and visualizations. *SoftwareX*, 12, 100563.