Journal of Agricultural and Biosystem Engineering Research
Vol. 5 No. 1, Mei 2024, 43-53
http://jos.unsoed.ac.id/index.php/jaber/index | P-ISSN: 2722-3620 | e-ISSN: 2776-821X

EFISIENSI SISTEM VENTILASI ALAMI DALAM PENGENDALIAN PM2.5 DAN PENINGKATAN KENYAMANAN TERMAL DI LABORATORIUM PROSES MANUFAKTUR FTI UNUGHA CILACAP

The Efficiency of Natural Ventilation Systems in Controlling PM2.5 and Enhancing Thermal Comfort in the Manufacturing Process Laboratory of FTI UNUGHA Cilacap

[1]Fajar Zakaria, [1*]Christian Soolany, [1]Frida Amriyati Azzizzah

[1] Universitas Nahdlatul Ulama Al Ghazali Cilacap, Fakultas Teknologi Industri, Teknik Mesin Cilacap, Indonesia

* Email: christiansoolany@gmail.com

DOI: http://dx.doi.org/10.20884/1.jaber.2024.5.1.13554
Naskah ini diterima pada 27 Oktober 2024; revisi pada 3 Desember 2024; disetujui untuk dipublikasikan pada 20 Desember 2024

ABSTRAK

Efisiensi ventilasi alami memiliki peran penting dalam menjaga kualitas udara dan kenyamanan termal di lingkungan kerja, terutama di laboratorium untuk proses Pendidikan. Salah satunya Laboratorium Proses Manufaktur FTI UNUGHA Cilacap menghadapi tantangan berupa tingginya konsentrasi PM2.5 serta kondisi termal yang tidak optimal. Kualitas udara yang buruk dan lingkungan yang tidak nyaman dapat berdampak negatif terhadap kesehatan pengguna dan kinerja operasional. Untuk mengukur efektivitas sistem ventilasi alami, dilakukan pengamatan dan pengukuran konsentrasi PM2.5, formaldehida (HCHO), suhu, dan kelembaban menggunakan Air Quality Meter dan Environment Meter. Selain itu, analisis Air Change per Hour (ACH) digunakan sebagai indikator aliran udara. Data yang diperoleh dibandingkan dengan standar yang ditetapkan oleh PERMENKES dan ASHRAE untuk menilai kinerja sistem ventilasi. Hasil pengukuran menunjukkan konsentrasi PM2.5 mencapai 155 µg/m³, melebihi batas aman 65 µg/m³. Konsentrasi HCHO berada dalam batas aman dengan nilai maksimum 0,01 mg/m³. Suhu rata-rata laboratorium sebesar 28,1°C dan kelembaban 76,6%, keduanya melampaui standar kenyamanan termal. ACH yang tercatat sebesar 68,9 kali per jam menunjukkan sirkulasi udara yang tinggi, melebihi rekomendasi ASHRAE sebesar 10–20 kali per jam. Meskipun ventilasi alami menunjukkan efisiensi dalam aliran udara, hasil pengamatan mengindikasikan perlunya optimisasi sistem untuk mencapai keseimbangan antara kualitas udara dan kenyamanan termal. Penyesuaian ukuran dan jumlah bukaan ventilasi direkomendasikan agar kondisi lingkungan dapat mendukung produktivitas dan kesehatan pengguna laboratorium..

Kata kunci: Ventilasi Alami, PM2.5, Air Change per Hour, Formaldehida, Kenyamanan Termal

ABSTRACT

The efficiency of natural ventilation plays a crucial role in maintaining air quality and thermal comfort in work environments, particularly in educational laboratories. One such example is the Manufacturing Process Laboratory at FTI UNUGHA Cilacap, which faces challenges in the form of high PM2.5 concentrations and suboptimal thermal conditions. Poor air quality and uncomfortable environments can negatively impact users' health and operational performance. To evaluate the effectiveness of the natural ventilation system, observations and measurements of PM2.5 concentration, formaldehyde (HCHO), temperature, and humidity were conducted using an Air Quality Meter and an Environment Meter. Additionally, the Air Change per Hour (ACH) analysis was used as an indicator of airflow. The data collected were compared with the standards set by PERMENKES and ASHRAE to assess the ventilation system's performance.The results show that the PM2.5 concentration reached 155 µg/m³, exceeding the safe limit of 65 µg/m³. HCHO concentration remained within the safe range, with a maximum value of 0.01 mg/m³. The average laboratory temperature was recorded at 28.1°C, and the humidity at 76.6%, both surpassing thermal comfort standards. The ACH was measured at 68.9 times per hour, indicating high airflow circulation, which exceeds ASHRAE's recommendation of 10–20 times per hour. Although the natural ventilation system demonstrated efficiency in airflow circulation, the observations indicate the need for system optimization to balance air quality and thermal comfort. Adjusting the size and number of ventilation openings is recommended to create an environment that supports both productivity and users' health.

Keywords: *Natural Ventilation, PM2.5, Air Change per Hour, Formaldehyde, Thermal Comfort*

PENDAHULUAN

Kualitas udara dalam ruangan (*Indoor Air Quality*) merupakan faktor krusial yang berdampak langsung pada kesehatan, kenyamanan, dan produktivitas individu, khususnya di lingkungan laboratorium. Laboratorium proses manufaktur berperan penting dalam mendukung kegiatan pendidikan, penelitian, serta pengembangan teknologi. Meskipun memiliki fungsi vital, laboratorium ini juga berpotensi menjadi sumber paparan polutan udara yang dapat membahayakan kesehatan dan keselamatan penggunanya, seperti mahasiswa, dosen, dan pengguna lainnya. Paparan kualitas udara yang buruk di laboratorium berisiko menimbulkan masalah kesehatan serius, termasuk munculnya *Sick Building Syndrome* (SBS). SBS adalah kondisi di mana penghuni ruangan mengalami berbagai gejala kesehatan yang terkait dengan paparan udara berkualitas rendah selama berada di dalam ruangan tersebut (Mardika, 2023).

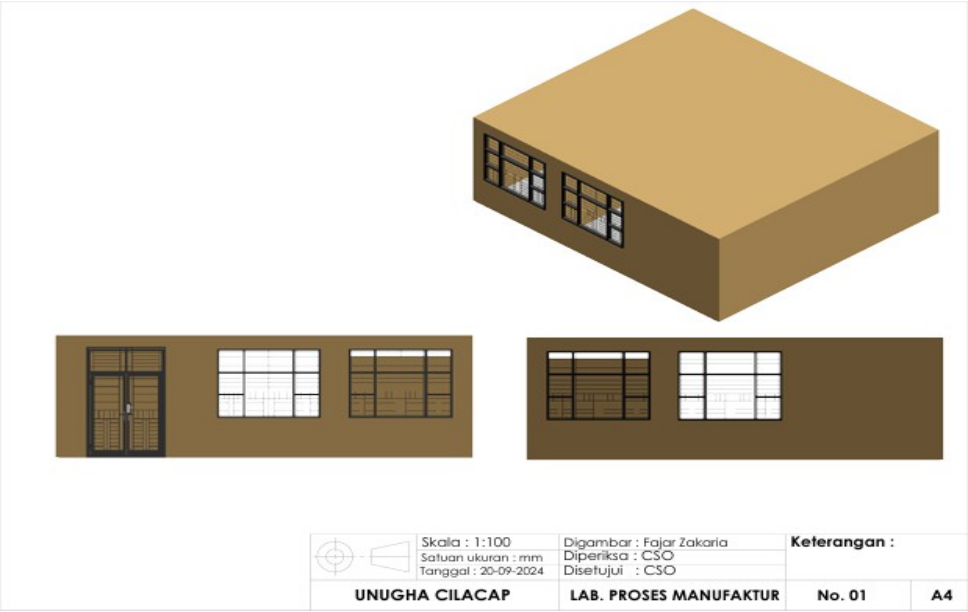
Sistem ventilasi memiliki peran penting dalam menjaga kualitas udara dan kenyamanan termal di dalam ruangan, terutama di lingkungan pendidikan seperti laboratorium. Kualitas udara yang buruk dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan seperti gangguan pernapasan dan sindrom bangunan sakit atau Sick Building Syndrome (WHO, 2019). Selain itu, kenyamanan termal menjadi aspek esensial karena berpengaruh langsung terhadap produktivitas dan kinerja pengguna laboratorium (ASHRAE, 2019). Oleh karena itu, penerapan sistem ventilasi alami sebagai solusi efisien dan ramah lingkungan menjadi perhatian utama dalam desain bangunan pendidikan dan operasional laboratorium di iklim tropis.

Laboratorium Proses Manufaktur FTI UNUGHA Cilacap, sebagai bagian dari fasilitas Pendidikan yang dimiliki oleh Universitas Nahdlatul Ulama Al Ghazali Cilacap, mengandalkan

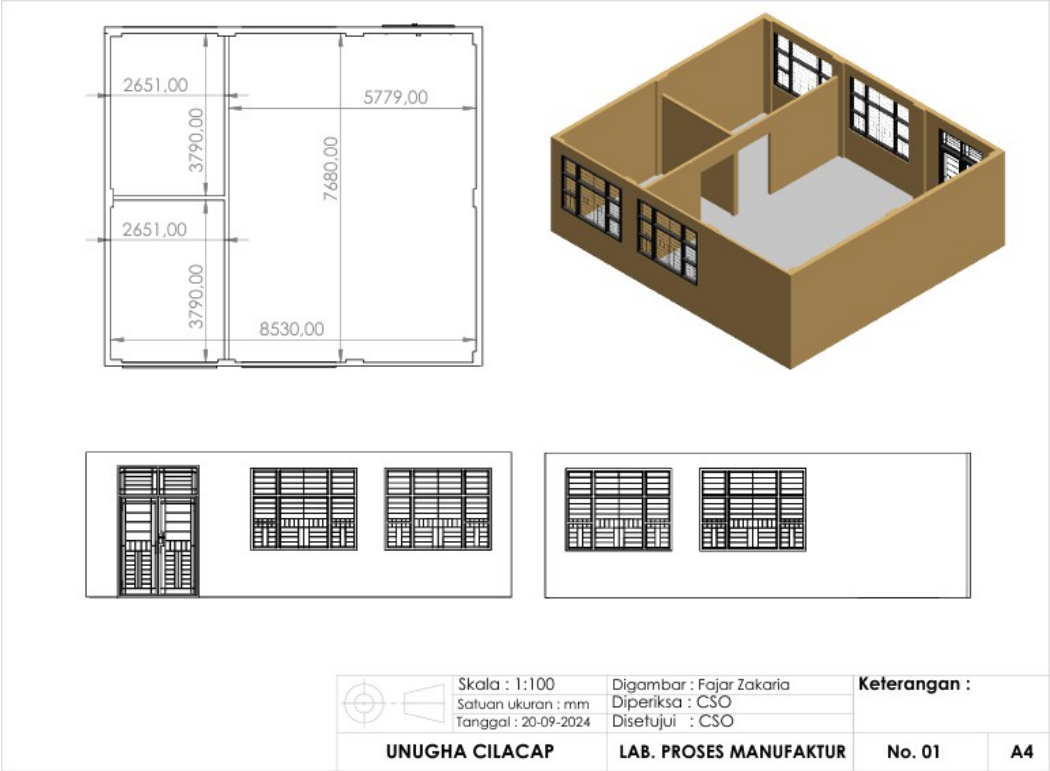
ventilasi alami untuk mendukung sirkulasi udara dan mengurangi risiko paparan polutan. Namun, laboratorium ini menghadapi tantangan berupa tingginya konsentrasi PM2.5, yang merupakan salah satu polutan berbahaya. Berdasarkan hasil pengukuran, konsentrasi PM2.5 di laboratorium mencapai 155 µg/m³, jauh di atas ambang batas aman 65 µg/m³ yang ditetapkan oleh PERMENKES No. 1077/MENKES/PER/V/2011. Konsentrasi PM2.5 yang tinggi dapat memicu gangguan pernapasan dan berdampak negatif pada kesehatan pengguna, terutama jika terpapar dalam waktu lama (1077/MENKES/PER/V/2011, 2011).

Selain PM2.5, formaldehida (HCHO) juga menjadi perhatian, karena dikenal sebagai senyawa berpotensi karsinogenik. Meskipun konsentrasi HCHO yang diukur di laboratorium masih berada dalam ambang batas aman, yakni sebesar 0,01 mg/m³ (di bawah standar 0,1 mg/m³), pemantauan tetap diperlukan untuk memastikan keamanan jangka panjang (Nugroho, 2019).

Kenyamanan termal di laboratorium ini juga menjadi fokus karena berpengaruh pada produktivitas pengguna. Berdasarkan rekomendasi ASHRAE (2019), suhu ideal untuk lingkungan laboratorium berkisar antara 22-26°C dengan kelembaban relatif antara 45-65%. Namun, hasil pengukuran menunjukkan bahwa suhu rata-rata di laboratorium mencapai 28,1°C dengan kelembaban 76,6%, yang melebihi standar kenyamanan termal. Kondisi ini dapat menurunkan kenyamanan dan kinerja pengguna, serta memicu kelelahan dan penurunan produktivitas (Mardika A. , 2023). Gambar 1 menunjukkan sketsa ruang Laboratorium Proses Manufaktur FTI UNUGHA. Gambar 2 menunjukkan lokasi ventilasi udara.



Gambar 1. Sketsa Laboratorium Proses Manufaktur



Gambar 2 . Ventilasi Laboratorium Proses Manufaktur

Meskipun sirkulasi udara di laboratorium ini tercatat cukup baik, dengan Air Change per Hour (ACH) sebesar 68,9 kali per jam (melebihi standar ASHRAE 10–20 kali per jam), hasil observasi menunjukkan bahwa optimisasi lebih lanjut diperlukan. ACH yang tinggi menunjukkan aliran udara yang baik, tetapi tanpa pengendalian suhu dan kelembaban, kenyamanan termal tetap tidak dapat tercapai secara optimal (ASHRAE, 2019).

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa ventilasi alami dapat mengurangi konsentrasi polutan dan meningkatkan kualitas udara di berbagai lingkungan, terutama di bangunan beriklim tropis (Andriani, 2021). Namun, efektivitas ventilasi alami sangat bergantung pada desain bangunan, orientasi bukaan, dan kondisi iklim lokal. Oleh karena itu, penelitian ini menekankan pada evaluasi menyeluruh terhadap sistem ventilasi alami di Laboratorium Proses Manufaktur FTI UNUGHA Cilacap, dengan fokus pada dua aspek utama:

1. Pengendalian kualitas udara melalui pengukuran konsentrasi PM2.5 dan HCHO, serta membandingkannya dengan standar yang berlaku.
2. Evaluasi kenyamanan termal berdasarkan pengukuran suhu, kelembaban, dan ACH, dengan membandingkannya terhadap standar ASHRAE dan PERMENKES.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi penting dalam pengembangan dan optimisasi sistem ventilasi alami di lingkungan pendidikan, serta memberikan rekomendasi praktis bagi manajemen laboratorium untuk menciptakan lingkungan kerja yang sehat dan nyaman. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan menjadi acuan bagi penerapan sistem ventilasi alami di laboratorium serupa yang berada di wilayah tropis.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif untuk mengevaluasi efisiensi ventilasi alami dalam mengendalikan kualitas udara dan meningkatkan kenyamanan termal di Laboratorium Proses Manufaktur FTI UNUGHA Cilacap. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Proses Manufaktur FTI UNUGHA Cilacap pada September hingga Oktober 2024 selama jam operasional laboratorium. Pemilihan waktu ini bertujuan untuk mendapatkan data representatif terkait kondisi kualitas udara dan termal. Alat yang digunakan yaitu *Air Quality Meter* berfungsi mengukur konsentrasi *particulate matter* (PM2.5), *Formaldehida* (HCHO), suhu, dan kelembaban. Gambar 3 menunjukkan Alat ukur *Air Quality Meter Type Contact*.

Gambar 3. Alat uklur kualitas udara

Alat ukur selanjutnya yaitu *Environment Meter* berfungsi untuk mengukur kecepatan angin untuk menghitung laju aliran udara. Gambar 4 menunjukkan alat ukur *Environment Meter*.

Gambar 4. Alat ukur kecepatan udara

Variabel penelitian yang digunakan pada penelitian ini dibagi menjadi 3 yaitu

1. Variabel Bebas
   Ventilasi alami (laju aliran udara dan frekuensi pergantian udara).
2. Variabel Terikat
   Kualitas udara (PM2.5, HCHO, suhu, dan kelembaban).
3. Variabel Kendali
   Kondisi lingkungan (jumlah mesin aktif, waktu operasi, jumlah pengguna laboratorium).

Prosedur penelitian dimulai dari Survei tata letak ventilasi dan penentuan titik pengukuran selanjutnya Kalibrasi alat ukur sebelum pengukuran. Pengukuran dilakukan pada beberapa titik di dalam laboratorium (dekat pintu, ventilasi, dan tengah ruangan). Setiap parameter diukur setiap jam mulai pukul 09.00 hingga 16.00 untuk memantau perubahan kualitas udara.

Data yang diperoleh dibandingkan dengan standar:

a) PM2.5: Maksimum 65 µg/m³ (PERMENKES No. 1077/MENKES/PER/V/2011).
b) HCHO: Batas aman 0,1 mg/m³.
c) Suhu: 22-26°C (ASHRAE, 2019).
d) Kelembaban: 45-65%.

Penghitungan ACH dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas ventilasi dalam sirkulasi udara. Hasil kemudian dianalisis dan dibandingkan dengan standar ASHRAE dan PERMENKES untuk mengetahui tingkat efisiensi ventilasi alami di laboratorium. Kriteria keberhasilan yaitu

a) Konsentrasi PM2.5 dan HCHO sesuai ambang batas yang berlaku.
b) Suhu dan kelembaban berada dalam rentang standar kenyamanan.
c) ACH memenuhi atau melebihi standar ASHRAE.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengukuran dan analisis efisiensi ventilasi alami di Laboratorium Proses Manufaktur FTI UNUGHA Cilacap akan disajikan secara terperinci. Data yang diperoleh mencakup parameter PM2.5, f*ormaldehida* (HCHO), suhu, kelembaban, serta perhitungan *Air Change per Hour* (ACH**)**. Pengukuran dilakukan pada empat titik berbeda di dalam laboratorium selama jam operasional (09.00–16.00 WIB) untuk mendapatkan data yang representatif. Berikut adalah hasil pengukuran parameter kualitas udara ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil pengukuran kualitas udara

Durasi Penelitian	**PM2.5 (µg/m³)**	**HCHO (mg/m³)**	**Suhu (°C)**	**Kelembaban (%)**
09.00 - 10.00.	153	0.01	25.8	81.4
10.00 - 11.00.	155	0.01	28.3	79.8
11.00 - 12.00.	136	0.00	29.4	73.2
12.00 - 13.00	29	0.01	30.4	76.1
13.00 - 14.00.	57	0.00	28.3	73.8
14.00 - 15.00	18	0.00	27.2	77.2
15.00 - 16.00	17	0.00	27,7	75.2

a) Analisis PM 2.5

Particulate Matter 2.5 (PM2.5) adalah partikel halus yang berukuran kurang dari 2,5 mikrometer (µg/m³) dan tersebar di udara. Karena ukurannya yang sangat kecil dan tidak terlihat oleh mata, PM2.5 dapat dengan mudah terhirup dan masuk ke dalam sistem pernapasan manusia. Hal ini dapat menimbulkan risiko kesehatan yang serius bagi mahasiswa, dosen, serta pengguna laboratorium lainnya.

Untuk mengidentifikasi tingkat risiko yang ditimbulkan oleh paparan PM2.5, pemerintah Indonesia telah menetapkan Nilai Ambang Batas (NAB) melalui Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 1077/MENKES/PER/V/2011. Batas aman untuk paparan harian PM2.5 adalah 65 µg/m³, sedangkan paparan tahunan tidak boleh melebihi 15 µg/m³.

Hasil pengukuran dalam penelitian ini menunjukkan beberapa temuan penting terkait konsentrasi PM2.5 di laboratorium:

1. Konsentrasi tertinggi PM2.5 tercatat pada pukul 10.00–11.00 WIB, dengan rata-rata mencapai 156 µg/m³. Konsentrasi tertinggi ditemukan di Titik 3, yaitu sebesar 298 µg/m³. Kadar polutan yang tinggi ini disebabkan oleh aktivitas pengelasan dan pengujian kebisingan mesin pelet ikan tipe screw berbasis motor listrik, di mana aktivitas tersebut berlangsung di sekitar Titik 3.
2. Konsentrasi terendah PM2.5 terjadi pada pukul 15.00–16.00 WIB, dengan rata-rata sebesar 17 µg/m³. Rendahnya konsentrasi pada periode ini disebabkan oleh selesainya aktivitas pengelasan dan pengujian mesin.

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa kegiatan seperti pengelasan dan pengujian mesin di laboratorium proses manufaktur dapat meningkatkan konsentrasi PM2.5 ke level yang berbahaya bagi kesehatan pengguna. Oleh karena itu, diperlukan upaya pencegahan, seperti penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) yang memadai. Pengguna laboratorium disarankan menggunakan masker N95, yang dirancang untuk menyaring partikel halus, selama kegiatan praktikum atau pengujian alat berlangsung di laboratorium (Ernada, 2023).

b) Analisis HCHO

Pada penelitian ini, konsentrasi formaldehida (HCHO) berada pada kategori “Good” yang ditandai dengan lingkaran hijau pada alat Air Quality Meter. Nilai yang terukur berkisar antara 0,00 mg/m³ hingga 0,01 mg/m³, yang menunjukkan bahwa kondisi udara di Laboratorium Proses Manufaktur aman dari kandungan formaldehida. Hasil ini juga sesuai dengan standar nasional yang diatur dalam PERMENKES No. 1077/MENKES/PER/V/2011, di mana ambang batas konsentrasi formaldehida ditetapkan sebesar 0,1 mg/m³ untuk paparan selama 30 menit. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa aktivitas yang berlangsung di laboratorium selama penelitian tidak memproduksi polutan HCHO dalam jumlah yang signifikan.

Meskipun hasil pengukuran menunjukkan kondisi yang baik, pemantauan kualitas udara secara berkala tetap diperlukan. Hal ini bertujuan untuk mencegah risiko iritasi saluran pernapasan dan mengurangi kemungkinan dampak karsinogenik yang bisa terjadi akibat paparan jangka panjang (Areas, 2020).

c) Analisis Suhu

Suhu merupakan salah satu faktor utama yang menentukan tingkat kenyamanan dan keselamatan di ruang kerja seperti Laboratorium Proses Manufaktur. Selain itu, suhu juga

mempengaruhi kinerja optimal mesin dan peralatan yang digunakan di laboratorium serta berpotensi meningkatkan konsentrasi polutan udara di dalam ruangan.

a) Pengukuran suhu tertinggi dalam penelitian ini mencapai 30,4°C, sedangkan suhu terendah tercatat 25,8°C. Data ini merupakan hasil rata-rata pengukuran yang dilakukan di Titik 1 hingga Titik 4, dengan rentang waktu 09.00 hingga 16.00 WIB.
b) Rata-rata suhu total dari seluruh pengukuran menunjukkan angka 28,1°C, yang lebih tinggi dibandingkan standar SNI 03-6572-2-2001 untuk ruang kerja, di mana suhu ideal seharusnya berkisar antara 22°C hingga 26°C. Hasil ini juga melampaui kategori Hangat Nyaman, yang berkisar antara 25,8°C hingga 27,1°C, meskipun masih di bawah batas maksimum NAB yaitu 30°C.
c) Berdasarkan standar kenyamanan termal dari SNI dan ASHRAE, suhu rata-rata 28,1°C berada di atas rentang optimal yang direkomendasikan. Kondisi ini dapat memengaruhi kenyamanan pengguna dan menurunkan produktivitas mereka.

Untuk mengatasi kondisi ini, beberapa langkah perbaikan yang dapat diterapkan meliputi:

1. Meningkatkan aliran udara dengan membuka jendela atau menggunakan kipas angin untuk mempercepat sirkulasi. Selain itu, pemasangan jendela cerdas yang dapat mengatur intensitas cahaya masuk atau penggunaan tirai termal akan membantu mengurangi panas.
2. Ventilator atap bisa dipasang untuk membantu mengeluarkan udara panas dari bagian atas ruangan, karena udara panas cenderung terkumpul di area atas.
3. Penambahan ventilasi mekanis seperti exhaust fan untuk mempercepat sirkulasi udara, terutama saat aktivitas laboratorium dengan beban panas tinggi sedang berlangsung.
4. Mengganti material atap atau dinding dengan bahan yang memiliki isolasi termal tinggi agar panas dari luar dapat dikurangi.

Dengan penerapan solusi ini, suhu di laboratorium dapat diturunkan sehingga memenuhi standar kenyamanan yang ditetapkan dan mendukung kondisi kerja yang lebih baik bagi pengguna.

d) Analisis Kelembaban

Selain suhu, kelembaban udara juga merupakan faktor penting yang berperan dalam menentukan kenyamanan termal, kesehatan pengguna, dan kinerja peralatan di Laboratorium Proses Manufaktur. Kelembaban yang tidak terkontrol dapat berdampak negatif pada produktivitas dan operasional peralatan.

a) Rata-rata kelembaban di laboratorium berdasarkan hasil pengukuran tercatat sebesar 76,6% RH. Angka ini berada di atas ambang batas ideal yang ditetapkan oleh Peraturan Menteri Kesehatan No. 261/MENKES/PER/III/2004, di mana kelembaban ideal berkisar antara 45–65% RH.
b) Kelembaban di laboratorium dapat mengalami perubahan seiring dengan pergantian cuaca, terutama karena Indonesia memiliki iklim tropis. Selama musim hujan, tingkat kelembaban biasanya meningkat lebih tinggi, yang berpotensi memperburuk kondisi lingkungan kerja.
c) Kelembaban tinggi menyebabkan tubuh pengguna merasa lebih panas dan tidak nyaman. Hal ini disebabkan oleh terganggunya proses penguapan keringat, yang merupakan mekanisme alami tubuh untuk mendinginkan diri.

Akibatnya, pengguna bisa merasa gerah dan tidak nyaman selama beraktivitas di laboratorium.

d) Selain berdampak pada kenyamanan pengguna, kelembaban tinggi juga memicu kondensasi pada permukaan alat dan material di laboratorium. Kondisi ini dapat merusak peralatan elektronik atau material lain yang sensitif terhadap kelembaban. Kelembaban berlebih juga mempercepat proses korosi pada peralatan logam dan mesin, sehingga menurunkan umur pakai dan efisiensi peralatan yang digunakan.

Dengan demikian, penting bagi pengelola laboratorium untuk memantau dan mengontrol kelembaban udara secara berkala. Langkah ini akan membantu menjaga kenyamanan dan keselamatan pengguna sekaligus memastikan peralatan dapat berfungsi dengan optimal dan memiliki umur pakai yang lebih lama.

e) *Air Change per Hour* (ACH)

Pengukuran pergantian udara di laboratorium bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas sistem ventilasi alami dalam memperbarui udara dalam ruangan. Tabel 2 menunjukkan hasil pengukuran ACH.

Tabel 2. Hasil pengukuran ACH

Durasi Penelitian	**Volume Ruang (m^3)**	**Luas Ventilasi (m^2)**	**Kecepatan Udara (m/s)**	**Laju Aliran Udara (m^3/s)**	**ACH (Per Jam)**
09.00-10.00 WIB	133,1	7,01	0.27	1.89	51.1
10.00-11.00 WIB	133,1	7,01	0.31	2.17	58.6
11.00-12.00 WIB	133,1	7,01	0.20	1.40	37.8
12.00-13.00 WIB	133,1	7,01	0.45	3.15	85.1
13.00-14.00 WIB	133,1	7,01	0.37	2.59	70
14.00-15.00 WIB	133,1	7,01	0.48	3.36	90.8
15.00-16.00 WIB	133,1	7,01	0.47	3.29	88.9
Rata-rata Air Change Hour					68.9

Hasil pengukuran Air Change per Hour (ACH) menunjukkan bahwa udara di laboratorium terganti dengan cepat, sebagaimana tercermin dari nilai rata-rata ACH sebesar 68,9 kali per jam. Tingginya nilai ini menandakan bahwa sistem ventilasi alami bekerja secara efektif dalam mengganti udara yang mengandung polutan. Berikut adalah analisis rinci terhadap pengukuran dan perubahan nilai ACH berdasarkan waktu.

1) Variasi ACH berdasarkan waktu pengukuran

a) 09.00–10.00 WIB (ACH: 51,1)
Pada pagi hari, pergantian udara cenderung lebih rendah karena perbedaan suhu dalam dan luar ruangan masih kecil, sehingga aliran udara tidak maksimal.

b) 11.00–12.00 WIB (ACH: 37,8)
ACH menurun karena kondisi lingkungan lebih stabil, dengan sedikit perubahan dalam pola aliran udara.

c) 13.00–14.00 WIB (ACH: 70,0)
Terdapat peningkatan ACH seiring dengan suhu luar yang meningkat, memicu pergerakan udara yang lebih cepat.

d) 15.00–16.00 WIB (ACH: 88,9)
Pergantian udara mencapai puncaknya karena perbedaan tekanan dan suhu antara dalam dan luar ruangan semakin besar pada sore hari.

2) Analisis efisiensi ventilasi alami
Tingginya nilai ACH di laboratorium menunjukkan bahwa udara dalam ruangan terganti dengan cepat, yang membantu mengurangi konsentrasi polutan seperti PM2.5 dan formaldehida (HCHO). Namun, pergantian udara yang terlalu cepat dapat menimbulkan beberapa dampak negatif, seperti:
   a) Pemborosan Energi
   Udara segar yang masuk membutuhkan pendinginan atau pemanasan tambahan agar suhu ruangan tetap nyaman.
   b) Ketidakstabilan Suhu dan Kelembaban
   Aliran udara yang berlebihan dapat menyebabkan fluktuasi suhu dan kelembaban, sehingga memengaruhi kenyamanan termal dan mempercepat korosi pada peralatan .

3) Rekomendasi untuk optimasi ventilasi
Untuk mencapai keseimbangan antara efisiensi energi dan kualitas udara, beberapa solusi dapat diterapkan.
   a) Kombinasi Ventilasi Alami dan Mekanis
   Mengintegrasikan sistem ventilasi mekanis seperti exhaust fan untuk memastikan sirkulasi udara tetap optimal meski kondisi luar tidak mendukung.
   b) Pemantauan Kualitas Udara Secara *Real-Time*
   Implementasi sistem kontrol otomatis untuk menyesuaikan laju ventilasi berdasarkan kondisi udara saat itu.
   c) Pemeliharaan Ventilasi Secara Berkal
   Membersihkan bukaan ventilasi dan memastikan tidak ada hambatan pada aliran udara untuk menjaga efisiensi sistem.

Meskipun sistem ventilasi alami di laboratorium ini menunjukkan kinerja yang baik dalam memperbarui udara, fluktuasi ACH di berbagai waktu menunjukkan bahwa sistem ini sangat bergantung pada kondisi lingkungan (Yolanda, 2022). Oleh karena itu, penggabungan dengan ventilasi mekanis dan pemantauan berkala diperlukan untuk menjaga kualitas udara tetap optimal serta mengurangi dampak negatif seperti ketidakstabilan suhu dan kelembaban.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengukuran dan analisis yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem ventilasi alami di Laboratorium Proses Manufaktur FTI UNUGHA Cilacap bekerja dengan baik dalam memperbarui udara. Rata-rata Air Change per Hour (ACH) mencapai 68,9 kali per jam, jauh di atas standar ASHRAE untuk laboratorium manufaktur (10–20 ACH). Hal ini menunjukkan bahwa ventilasi alami mampu menjaga aliran udara dan membantu mengurangi konsentrasi polutan berbahaya seperti PM2.5. Meskipun demikian, terdapat beberapa tantangan yang perlu diperhatikan terkait kenyamanan termal dan efisiensi energi.

1) Kualitas Udara
   a) Konsentrasi PM2.5 mencapai puncaknya pada 156 µg/m³, jauh melebihi ambang batas 65 µg/m³, terutama saat aktivitas berat seperti pengelasan dan pengujian mesin berlangsung.
   b) Konsentrasi HCHO tetap dalam batas aman, dengan nilai maksimum 0,01 mg/m³, yang menunjukkan bahwa aktivitas laboratorium tidak menghasilkan polutan formaldehida dalam jumlah signifikan.
2) Kenyamanan Termal
   a) Suhu rata-rata laboratorium tercatat sebesar 28,1°C, di atas standar ideal 22–26°C, sehingga dapat mengurangi kenyamanan pengguna.
   b) Kelembaban udara juga tercatat tinggi pada 76,6%, melebihi batas ideal 45–65%, yang berpotensi menimbulkan rasa gerah dan mempercepat korosi pada peralatan.
3) Efisiensi dan Kendala Ventilasi Alami:
   a) Meskipun pergantian udara cepat, nilai ACH yang terlalu tinggi dapat menyebabkan pemborosan energi dan ketidakstabilan suhu serta kelembaban.
   b) Sistem ventilasi alami sangat bergantung pada kondisi lingkungan seperti pola angin dan suhu luar, sehingga diperlukan solusi tambahan untuk memastikan stabilitas kenyamanan termal dan efisiensi energi.

DAFTAR PUSTAKA

Andriani, N. (2021). *Pengaruh Ventilasi Alami terhadap Kualitas Udara di Lingkungan Tropis.* Jakarta, DKI Jakarta: Penerbit Ilmu Bangunan.

ASHRAE. (2019). *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality.* American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

Areas, I. U. (2020). Kinetika Formaldehida (HCHO) Dan Ozon (O3) di Daerah Urban (Studi Kasus: Jakarta). *Kinetika,, 12*(1).

Ernada, S. I. (2023). Pengukuran Dan Evaluasi Ventilasi Udara Berdasarkan SNI Pada Laboratorium Motor *Bakar*. *Journal of Student Research, 1*(4), 90 - 103.

Mardika, I. K. (2023). Kenyamanan Termal Dalam Ruang Pertemuan Umum Ditinjau Dari Aspek Sirkulasi Udara: Studi Kasus Handep Hapakat Kabupaten Pulang Pisau. *Jurnal Perspektif Arsitektur, 18*(1), 31 - 41.

Mardika, A. (2023). *Efektivitas Ventilasi Alami dalam Mengurangi Polutan di Lingkungan* Pendidikan. Jakarta: Pustaka Pendidikan.

Nugroho, B. (2019). *Ventilasi dalam Desain Bangunan Tropis.* Sleman, Yogyakarta, Indonesia: Gadjah Mada University Press.

Peratutan Menteri 1077/MENKES/PER/V/2011, P. N. (2011). *Standar Kualitas Udara dalam Ruangan.* Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.

Yolanda, N. P. (2022). Analisis pertukaran udara per jam pada ventilasi laboratorium di kawasan hutan hujan tropis. Progressive *Physics Journal, 3*(2), 184 - 190.

WHO. (2019). *World Health Organization.* Retrieved September 2024, from Guidelines for Indoor Air Quality: https://www.who.int/publications/i/item/9789241550058