



Analisis Optimalisasi Kapasitas Sistem Ventilasi *Exhaust* Berdasarkan Jumlah Lemari Penyimpanan Cairan Volatil di Laboratorium Industri Pelumas

Elysia Callysta Wibowo¹, Firra Rosariawari^{2*}

¹⁻²Program Studi Teknik Lingkungan, UPN “Veteran Jawa Timur, Indonesia

Email : 22034010047@student.upnjatim.ac.id¹, firra.tl@upnjatim.ac.id^{2*}

*Penulis Korespondensi: firra.tl@upnjatim.ac.id

Abstract. This study analyzes the conditions of extreme overcapacity in an installed exhaust ventilation system ($Q_{\text{installed}} = 18.00 \text{ m}^3/\text{minute}$) that serves four acid cabinet units, specifically for the storage of volatile Hazardous and Toxic Materials (B3) such as toluene and methanol in tightly sealed containers. Although high capacity ensures safety, this practice causes significant energy inefficiency and unnecessary negative pressure problems in the room. Based on engineering analysis using a conservative Air Change Rate (ACR) standard of 100 h^{-1} for liquid storage of $1.38 \text{ m}^3/\text{minute}$. By applying the industry standard safety factor (FoS) of 1.5, the ideal flow rate (Q_{ideal}) that must be allocated is $2.07 \text{ m}^3/\text{minute}$. The optimization analysis concludes that the currently installed system is theoretically capable of safely and efficiently serving 8 units of volatile storage acid cabinets, with the addition of 4 new cabinets to maximize efficiency and reduce energy waste. This utilizes 92% of the total capacity while maintaining a safety factor above 1.5.

Keywords: Acid Cabinet; Air Change Rate; Optimization; Safety Factor; Ventilation System.

Abstrak. Penelitian ini menganalisis kondisi kelebihan kapasitas ekstrem pada sistem ventilasi exhaust terpasang ($Q_{\text{terpasang}} = 18,00 \text{ m}^3/\text{menit}$) yang melayani empat unit lemari asam, khususnya untuk penyimpanan Bahan Bahaya dan Beracun (B3) yang volatil seperti toluen dan metanol dalam wadah tertutup rapat (bersegel). Meskipun kapasitas yang tinggi menjamin keselamatan, praktik ini menimbulkan inefisiensi energi yang signifikan dan masalah tekanan negatif ruangan yang tidak perlu. Berdasarkan analisis rekayasa menggunakan standar laju perubahan udara konservatif 100 h^{-1} untuk penyimpanan cairan sebesar $1,38 \text{ m}^3/\text{menit}$. Dengan menerapkan standar industri faktor keamanan (FoS) 1,5, laju aliran ideal (Q_{ideal}) yang harus dialokasikan adalah $2,07 \text{ m}^3/\text{menit}$. Analisis optimalisasi menyimpulkan bahwa sistem terpasang saat ini secara teoritis mampu melayani 8 unit lemari asam penyimpanan volatil secara aman dan efisien, penambahan 4 unit lemari baru untuk memaksimalkan efisiensi dan mengurangi pemborosan energi. Memanfaatkan 92% dari total kapasitas sambil mempertahankan faktor keselamatan di atas 1,5.

Kata kunci: Laju Perubahan Udara, Faktor Keamanan, Lemari Asam, Optimalisasi, Sistem Ventilasi.

1. LATAR BELAKANG

Sistem ventilasi *exhaust* yang efektif merupakan infrastruktur kritis dalam operasional laboratorium yang menangani Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) (Saing et al., 2023), khususnya di area penyimpanan cairan kimia yang mudah menguap (volatil) seperti toluen dan metanol. Kinerja exhaust lemari asam penyimpanan cairan volatil, adalah salah satu komponen utama dalam sistem penyimpanan cairan B3 yaitu tolueut dan metanol. Kinerja exhaust bergantung pada laju aliran udara yang memadai untuk menjaga konsentrasi uap berbahaya di bawah batas paparan yang diizinkan (*Permissible Exposure Limit/PEL*) (Chen et al., 2019). Hal ini penting untuk memastikan keselamatan pekerja dan lingkungan kerja.

Perancangan sistem ventilasi yang bersifat konservatif (cenderung *oversize*) untuk menjamin keselamatan dalam kondisi terburuk, praktik ini menimbulkan rasio *oversizing* yang terlalu tinggi. Rasio yang berlebihan ini berdampak pada dua aspek utama : (1) Inefisiensi

energi, karena daya yang terpakai jauh melebihi kebutuhan minimal (Institute, 2015) dan (2) Masalah tekanan ruangan, karena penarikan udara yang masif dapat menyebabkan tekanan negatif yang mengganggu keseimbangan ruangan dan berpotensi menarik kontaminan dari luar (Ivanov et al., 2021).

Berdasarkan data lapangan, kapasitas exhaust terpasang ($Q_{\text{terpasang}}$) adalah $18 \text{ m}^3/\text{menit}$. Data ini didapatkan dari pengukuran awal kecepatan udara yaitu $0,3 \text{ m/s}$ yang kemudian dikonversikan menjadi laju aliran volume. Saat ini, sistem tersebut dialokasikan untuk 4 unit lemari asam. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis rekayasa untuk mengkuantifikasi tingkat ketidakefektifan sistem dan menentukan batas maksimum jumlah unit lemari asam yang dapat dilayani secara aman dan efisien oleh kapasitas terpasang tersebut (Alden, 1981).

2. KAJIAN TEORITIS

Konsep Laju Aliran Udara dan *Air Change Rate* (ACR)

Kinerja ventilasi lemari asam diukur menggunakan konsep *Air Changes per Hour* (ACR) dan laju aliran volume (volume flow rate) (Q). ACR adalah rasio yang menunjukkan beberapa kali volume udara di dalam lemari atau ruang diganti secara total dalam periode satu jam.

$$\begin{aligned} \text{Volume lemari (V}_{\text{lemari}}) &= P \times L \times T \\ V_{\text{lemari}} &= 1,09 \times 0,46 \times 1,65 \\ &= 0,827 \text{ m}^3 \end{aligned}$$



Gambar 1. Tampilan Lemari Asam dengan Ukuran.

Laju Aliran Kebutuhan (Q_{min}) standar keselamatan dan ventilasi (seperti ACGIH) menyarankan ACR tinggi, antara $60 - 150 \text{ h}^{-1}$ (Kalra & Tareq, 2025), untuk lemari penyimpanan cairan volatil dalam wadah tertutup. Penelitian ini mengambil ACR konservatif 100 h^{-1} sebagai basis perhitungan, didasarkan pada asumsi kritis bahwa B3 volatil disimpan kondisi tersegel penuh. Maka, Q_{min} dihitung :

$$\begin{aligned} Q_{min} &= \frac{100 \text{ h}^{-1} \times 0,827 \text{ m}^3}{60 \text{ menit/jam}} \\ &= 1,38 \text{ m}^3/\text{menit} \end{aligned}$$

Q_{min} adalah kapasitas kipas minimum yang harus terpasang.

Justifikasi Faktor Keamanan (Factor of Safety -FoS) 1,5

Dalam rekayasa ventilasi industry, penetapan Q_{min} (laju minimum) harus disertai dengan faktor keamanan (Factor of Safety – FoS) untuk memastikan keandalan operasional. Nilai FoS sebesar 1,5 (atau 150%) Adalah standar industry yang umum diadopsi untuk aplikasi kritis menangani Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) (Ashrae, 2015).

Tujuan utama penerapan FoS 1,5 adalah untuk menjamin bahwa konsentrasi uap berbahaya dijaga jauh di bawah batas paparan yang diizinkan (Permissible Exposure Limit/PEL) (Jane et al., 1998). Secara teknis, factor keamanan ini berfungsi untuk :

- Mengakomodasi Ketidakpastian : Memberikan margin untuk mengkompensasi ketidakakuratan pengukuran lapangan, variasi kinerja kipas, dan toleransi instalasi sistem.
- Deteriorasi Kinerja : Mengantisipasi penurunan kipas (*fan degradation*) dan peningkatan hambatan sistem dari waktu ke waktu.
- Kepatuhan Keselamatan : Menetapkan Q_{ideal} yang harus terpasang sehingga laju aliran yang dialokasikan untuk setiap lemari adalah 150% dari kebutuhan minimum kritis.

Oleh karena itu, kebutuhan laju aliran ideal (Q_{ideal}) per lemari, termasuk faktor keamanan standar industri 1,5 dihitung :

$$Q_{ideal} = FoS \times Q_{min} = 1,5 \times 1,38 \text{ m}^3/\text{menit} = 2,07 \text{ m}^3/\text{menit}$$

Nilai Q_{ideal} ini menjamin keselamatan penyimpanan B3 dalam lemari asam sekaligus menjaga efisiensi energi.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan Analisa Rekayasa Kuantitatif (Engineering Analysis) (Zaki, 2020), berfokus pada evaluasi kinerja sistem ventilasi yang sudah terpasang berdasarkan parameter teknis yang terukur

- 1) Pengumpulan data lapangan : Data primer yang dikumpulkan meliputi dimensi geometris lemari asam (P, L, T) dan laju aliran terpasang (Q_{ideal}) dari sistem exhaust saat ini, yaitu 0,3 m/s. Data $Q_{terpasang}$ diperoleh melalui pengukuran kecepatan udara oleh perusahaan. Sehingga, menjadikan itu sebagai data sekunder yang di analisa oleh penulis.
- 2) Penentuan kebutuhan standar : Menetapkan standar *Air Change Rate* (ACR) konservatif $100h^{-1}$ berdasarkan referensi keselamatan industry (ACGHI) dan menetapkan *Factor of Safety* (FoS) standar (1,5) untuk aplikasi B3.
- 3) Model Perhitungan : Model perhitungan utama yang digunakan adalah :
 - a. Perhitungan volume lemari (V_{lemari})
 - b. Perhitungan Kebutuhan laju aliran minimum (Q_{min})
 - c. Perhitungan kebutuhan laju aliran ideal (Q_{ideal}) dengan menyertakan FoS
 - d. Perhitungan Rasio Optimalisasi dengan membandingkan laju udara yang terpasang ($Q_{terpasang}$) terhadap total kebutuhan kritis (Q_{ideal})
 - e. Perhitungan ACR aktual dari sistem terpasang
 - f. Optimalisasi jumlah lemari ideal (N) yang dapat dilayani

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Laju aliran terpasang ($Q_{terpasang}$) sistem exhaust yang digunakan dalam analisis ini diverifikasi berdasarkan hasil pengukuran kecepatan udara rata-rata pada permukaan bukaan lemari asam. Pengukuran lapangan yang dilakukan selama triwulan 4 menunjukkan variasi kecepatan udara pada empat unit lemari asam, sebagaimana dirangkum pada Tabel 4.1.

Bulan	Lemari 1 (m/s)	Lemari 2 (m/s)	Lemari 3 (m/s)	Lemari 4 (m/s)	Rata-Rata Bulanan (m/s)
Oktober	0.31	0.29	0.33	0.3	0.3075
November	0.28	0.3	0.31	0.28	0.2925
Desember	0.29	0.34	0.27	0.31	0.3025
Rata-rata Triwulan 4					0.301

Gambar 2. Hasil Pengukuran Kecepatan Udara Rata-rata Bulanan Lemari Asam.

Sumber : Data Sekunder Laboratorium Industri Pelumas PT.X (2025)

Hasil penguruan rata-rata triwulan menunjukkan kecepatan udara sebesar 0,301 m/s. Nilai ini kemudian dikonversikan menjadi laju aliran terpasang sistem exhaust yang digunakan

dalam analisis ini diverifikasi berdasarkan hasil pengukuran kecepatan udara rata-rata pada permukaan bukaan lemari asam (Muta et al., 2022).

Aliran volume (Q) total. Berdasarkan data teknis dari PT. X yang diperoleh, nilai 0,3 m/s dikonversikan menjadi kapasitas exhaust terpasang ($Q_{terpasang}$) sebesar $18 \text{ m}^3/\text{menit}$. Angka tersebut menjadi basis perhitungan dan evaluasi kinerja sistem yang terpasang saat ini.

Dalam kinerja sistem yang terdapat pada lemari asam laboratorium perusahaan saat ini melayani 4 unit lemari asam dengan pipa exhaust yang dipasang secara seri.



Gambar 3. Lemari asam penyimpanan B3.

Berdasarkan perhitungan kajian teoritis, kebutuhan laju aliran minimum (Q_{min}) untuk setiap lemari adalah $1,38 \text{ m}^3/\text{menit}$. Dengan demikian, total kebutuhan minimum kritis untuk melayani 4 lemari adalah :

$$\begin{aligned} Q_{total} &= Q_{min} \times 4 \text{ lemari} \\ &= 1,38 \text{ m}^3/\text{menit} \times 4 \text{ lemari} = 5,52 \text{ m}^3/\text{menit} \end{aligned}$$

Untuk mengukur tingkat kelebihan kapasitas, dihitung Rasio Optimalisasi sistem saat ini :

$$\begin{aligned} \text{Rasio Optimalisasi} &= \frac{Q_{terpasang}}{Q_{total}} \\ \text{Rasio Optimalisasi} &= \frac{18 \text{ m}^3/\text{menit}}{5,52 \text{ m}^3/\text{menit}} = 3,26 \end{aligned}$$

Rasio optimalisasi sebesar 3,26 menunjukkan bahwa sistem exhaust memiliki kapasitas 326% dari kebutuhan minimum kritis. Ini mengindikasikan kelebihan kapasitas yang sangat berlebihan, jauh melampaui faktor keamanan yang disarankan (1,5). Artinya, sistem exhaust telah mengalami oversizing yang signifikan ketika hanya melayani 4 lemari.

Tingkat Pergantian Udara (ACR) Aktual

Untuk menegaskan kelebihan daya, perlunya dianalisis ACR aktual yang diterima oleh setiap lemari. Laju aliran actual yang dialokasikan per lemari ($Q_{Aktual,1 \text{ lemari}}$) saat ini adalah (Xu & Zhou, 2017):

$$Q_{Aktual,1 \text{ lemari}} = \frac{Q_{terpasang}}{4 \text{ lemari}} = \frac{18 \text{ m}^3/\text{menit}}{4 \text{ lemari}} = 4,5 \text{ m}^3/\text{menit}$$

Selanjutnya, ACR aktual yang dicapai oleh setiap lemari dengan aliran $4,5 \text{ m}^3/\text{menit}$ dihitung menggunakan $V_{lemari} = 0,827 \text{ m}^3$

$$ACRAktual,1 \text{ lemari} = \frac{Q_{aktual,1 \text{ lemari}} \times 60 \text{ menit/jam}}{V_{lemari}}$$

$$ACRAktual,1 \text{ lemari} = \frac{4,5 \text{ m}^3/\text{menit} \times 60}{0,827 \text{ m}^3} = 326,48 \text{ h}^{-1}$$

ACR aktual sebesar $326,48 \text{ h}^{-1}$ jauh melebihi rentang standar ideal ($60 - 150 \text{ h}^{-1}$) yang seharusnya. Hasil ini secara meyakinkan mengkonfirmasi bahwa exhaust tersebut memiliki kelebihan daya yang sangat besar, yang tidak hanya menyebabkan pemborosan energi yang signifikan (Ridal & Nazallul, 2025), tetapi juga berpotensi menciptakan masalah tekanan negative ruangan. Ruangan tekanan negatif adalah ruangan dengan tekanan udara di dalamnya lebih rendah daripada area sekitarnya. Energi negative yang berlebihan dapat mengganggu kenyamanan kerja di area laboratorium (Qosim, 2020).

Jumlah lemari ideal (N) dihitung dengan membagi kapasitas terpasang dengan kebutuhan idela per unit lemari :

$$N = \frac{Q_{terpasang}}{Q_{ideal,1 \text{ lemari}}}$$

$$N = \frac{18 \text{ m}^3/\text{menit}}{2,07 \text{ m}^3/\text{menit}} = 8,69 \text{ unit}$$

Hasil ini menunjukkan bahwa system exhaust saat ini memiliki kapasitas yang cukup untuk melayani secara aman 8 unit lemari asam yang identik. Dengan alokasi $2,07 \text{ m}^3/\text{menit}$ per lemari, faktor keamanan 1,5 tercapai dan penggunaan energi dari kipas yang sudah terpasang menjadi optimal.

Sisa kapasitas ($1,44 \text{ m}^3/\text{menit}$ atau 8% dari total) adalah margin yang dijadikan justifikasi sebagai udara jaga-jaga. Optimalisasi ini tidak hanya menjamin keamanan konsentrasi uap B3 (dijaga jauh dibawah PEL dengan $FoS = 1,63$), tetapi juga memaksimalkan penggunaan aset $18 \text{ m}^3/\text{menit}$ yang sudah terpasang, secara signifikan mengurangi pemborosan energi. Penambahan 4 lemari (menjadi total 8 unit) adalah keputusan yang baik.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil analisis rekayasa menunjukkan bahwa sistem ventilasi exhaust terpasang dengan kapasitas 18 memiliki kelebihan kapasitas yang ekstrem ketika hanya dialokasikan untuk 4 unit lemari asam, dengan Rasio Optimalisasi mencapai 3,26 (326% dari kebutuhan kritis minimum). Kondisi ini menyebabkan Air Change Rate aktual per lemari mencapai 326, jauh melampaui standar ideal 60-150 (Ashrae, 2015), yang berujung pada inefisiensi energi yang signifikan dan potensi masalah tekanan negatif ruangan. Berdasarkan kebutuhan laju aliran ideal per lemari sebesar 2, 07 (mencakup $FoS = 1,5$). Kapasitas terpasang mampu melayani secara aman dan efisien hingga 8 unit lemari asam identik. Kesimpulan utamanya adalah penambahan 4 unit lemari asam baru merupakan keputusan teknis yang optimal, karena memanfaatkan sekitar 92% dari kapasitas terpasang, sehingga mencapai keseimbangan sempurna antara keselamatan operasional ($FoS > 1,5$) dan efisiensi energi.

Saran yang diberikan untuk laboratorium perusahaan industri pelumas adalah agar pihak teknis segera melakukan alokasi pipa tambahan dan instalasi 4 unit lemari asam baru dan direncanakan untuk diisi cairan B3 yang bersegel rapat (Ivanov et al., 2021). Langkah ini mengoptimalkan aset yang sudah terpasang dan secara signifikan mengurangi pemborosan energi yang terjadi saat ini. Selain itu, disarankan untuk melakukan analisis tindak lanjut untuk memverifikasi distribusi aliran udara melalui pengukuran tekanan statis di saluran pipa yang merata ke semua 8 lemari asam setelah instalasi, guna memastikan tercapainya Q_{ideal} pada setiap unit (Maulana et al., 2023).

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada pihak perusahaan industri pelumas PT.X, terkhusus tim laboratorium yang telah memberikan dukungan fasilitas, luang waktu untuk membantu penulis menentukan data sekunder sebagai bahan analisa di dalam jurnal ini, serta ulasan naskah. Terimakasih juga, untuk dosen pembimbing yang telah memberikan bantuan kepada penulis berupa ulasan analisis, dan ulasan naskah.

DAFTAR REFERENSI

- Alden, L. J. (1981). *Design of industrial exhaust systems*. The Industrial Press.
- ASHRAE. (2015). *ASHRAE laboratory design guide: Planning and operation of laboratory HVAC systems* (2nd ed.). ASHRAE.
- Chen, K., Wang, W., & Zhang, W. (2019). Investigation of influential factors on laboratory fume hood containment performance. *Science and Technology for the Built Environment*, 26, 1–14. <https://doi.org/10.1080/23744731.2019.1637192>

- Ivanov, K., Georgieva, N., Tasheva, S., & Gandova, V. (2021). Analysis of energy efficiency of an industrial system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1031(1), 012080. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1031/1/012080>
- Jane, H., Grubb, G., & Alvarro, L. (1998). *Industrial ventilation: A manual of recommended practice*. American Conference of Governmental Industrial Hygienists.
- Kalra, J., & Tareq, A. (2025). Human factors in design engineering and computing (pp. 243–244).
- Maulana, D., Rozak, O. A., Nurtiyanto, W. A., & Raharjo, T. (2023). Efisiensi daya dan konsumsi energi listrik pada penerangan jalan tol Pondok Aren. *ELC Journal*, 17(3). <https://doi.org/10.23960/elc.v17n3.2522>
- Muta, R., Chung, J., Li, C., Yoo, S.-J., & Ito, K. (2022). Pollutant capture efficiencies in and around the opening surface of a fume hood under realistic conditions. *Indoor and Built Environment*, 31(6), 1636–1653. <https://doi.org/10.1177/1420326X211066538>
- Purwarupa sistem pengendali kipas ventilasi udara menggunakan metode fuzzy logic. (2024). *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, 8(3).
- Qosim, N. (2020). Analisis kegagalan kompresor torak PK 60–150 dengan metode failure mode and effect analysis. *Jurnal Teknik Mesin*, 80–89.
- Ridal, Y., & Nazallul, C. (2025). Analisis pengaruh faktor daya terhadap efisiensi pemakaian energi listrik pada pelanggan golongan tarif I-3 PT PLN (Persero) UP3 Padang. *Ekasakti Jurnal Penelitian dan Pengabdian*, 5, 161–172.
- Saing, B., Kustiyah, E., Agustin, D. Y., & Amalia, R. Y. (2023). Main hazard control and hazardous material handling in environment testing laboratory. *Occupational Ergonomics*, 15(2), 175–184. <https://doi.org/10.22441/oe.2023.v15.i2.083>
- The Engineering ToolBox. (n.d.). *Air change rates in typical rooms and buildings*. Retrieved 2025 from https://www.engineeringtoolbox.com/air-change-rate-d_882.html
- Xu, Z., & Zhou, B. (2017). Calculation of air change rate. In Z. Xu & B. Zhou (Eds.), *Dynamic isolation technologies in negative pressure isolation wards* (pp. 147–161). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2923-3_5
- Zaki, A. K. (2020). *Pengembangan lemari asam (fume hood) dengan tiga variasi kecepatan menggunakan sistem otomatis pada Laboratorium Teknik Mesin Universitas Islam Riau* [Undergraduate thesis]. Universitas Islam Riau.