

Analisis Pengaruh Variasi Ukuran Bukaannya Regulator terhadap Debit Udara dan Resistansi pada Ventilasi Tambang

Dimas Agung Permadi^{1*}, Nuhindro Priagung Widodo², Muhammad Faisal Seprizal¹,
Zella Navtalia¹, Andy Yanottama¹

¹Program Studi Teknik Pertambangan, Universitas Jambi

²Program Studi Teknik Pertambangan, Institut Teknologi Bandung

*Koresponden email: dimasagungpermadi@unja.ac.id

Diterima: 15 September 2025

Disetujui: 20 September 2025

Abstract

Mine ventilation is a critical component in ensuring occupational safety and health. A key element of this system is the regulator, which controls airflow quantity within the ventilation network. This study analyzes the influence of regulator opening size and shape on airflow discharge and resistance through theoretical calculation, laboratory testing, and simulation using specialized software. A ventilation model was constructed using 10.9 cm diameter PVC pipes and a 225 W centrifugal fan, with regulator openings in circular and square shapes and several opening ratios. Airflow discharge and resistance were calculated using the *McPherson* equation and compared with laboratory measurements and software-based simulation results. The findings show that variations in opening size and shape significantly affect airflow and resistance. Increasing the opening ratio results in higher airflow and lower resistance, with square openings exhibiting greater resistance at small openings than circular ones. The calculation method demonstrates low error at medium to large openings, making it a reliable basis for the preliminary design of underground mine ventilation systems.

Keywords: *regulator, mine ventilation, airflow discharge, resistance, software simulation*

Abstrak

Sistem ventilasi tambang merupakan aspek vital dalam menjamin keselamatan dan kesehatan kerja. Salah satu elemen penting dalam sistem ini adalah regulator, yang berfungsi mengatur kuantitas aliran udara pada jaringan ventilasi. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi ukuran bukaannya regulator terhadap debit udara dan resistansi aliran melalui perhitungan teoritis, pengujian laboratorium, dan simulasi dengan perangkat lunak. Model jaringan ventilasi dibuat dari pipa PVC berdiameter 10,9 cm dengan sumber tekanan berupa fan sentrifugal berdaya 225 W, sedangkan regulator diuji dalam bentuk lingkaran dan kotak dengan beberapa rasio bukaannya. Nilai debit dan resistansi dihitung menggunakan persamaan *McPherson*, kemudian dibandingkan dengan data hasil pengujian laboratorium dan simulasi dengan perangkat lunak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi ukuran dan bentuk bukaannya regulator berpengaruh signifikan terhadap debit udara dan resistansi. Peningkatan rasio bukaannya menghasilkan debit yang lebih besar dan resistansi yang lebih kecil, sedangkan regulator berbentuk kotak cenderung memberikan resistansi lebih tinggi pada bukaannya kecil dibandingkan regulator berbentuk lingkaran. Pada perhitungan menunjukkan galat yang rendah pada variasi bukaannya menengah hingga besar, sehingga dapat diandalkan sebagai dasar perancangan sistem ventilasi tambang bawah tanah.

Kata kunci: *regulator, ventilasi tambang, debit udara, resistansi, simulasi perangkat lunak*

1. Pendahuluan

Ventilasi tambang bawah tanah merupakan faktor utama dalam menjaga keselamatan dan kesehatan kerja. Sistem ventilasi yang efektif tidak hanya memasok udara segar dan mengeluarkan gas berbahaya seperti metana dan karbon monoksida, tetapi juga mengendalikan suhu, kelembapan, dan partikel debu agar tetap berada pada tingkat yang aman bagi pekerja [1] [2]. Pencapaian kondisi lingkungan kerja yang sesuai standar membutuhkan perencanaan jaringan ventilasi yang cermat, termasuk pemilihan komponen pengendali aliran udara seperti fan utama, regulator, dan peralatan penyeimbang tekanan. Regulator, khususnya, berfungsi sebagai elemen resistansi buatan yang dapat digunakan untuk membagi debit udara secara tepat pada cabang-cabang jaringan ventilasi [3]. Dengan mengatur luas bukaannya regulator, insinyur ventilasi dapat memodifikasi distribusi aliran udara sesuai kebutuhan setiap area kerja.

Penentuan resistansi regulator umumnya mengandalkan perhitungan empiris yang memasukkan koefisien kontraksi (Cc) dan faktor kehilangan tekanan lokal (*shock-loss factor*, X) yang dipengaruhi oleh

geometri bukaan [4] [5]. Walaupun metode empiris ini telah lama digunakan, perkembangan teknologi simulasi jaringan dan *computational fluid dynamics* (CFD) memungkinkan evaluasi yang lebih mendalam terhadap fenomena aliran di sekitar regulator, termasuk turbulensi, pembentukan *vortex*, dan efek *vena contracta* [3][6]. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa hasil simulasi CFD dapat digunakan untuk memvalidasi dan memperbaiki estimasi resistansi yang diperoleh dari perhitungan empiris, terutama pada kondisi bukaan sangat kecil di mana efek turbulensi dominan [7] [8] . Di sisi lain, perangkat lunak jaringan seperti *Ventsim Visual* telah menjadi standar industri untuk memodelkan distribusi aliran udara dan menganalisis pengaruh penambahan resistansi lokal terhadap keseimbangan jaringan secara keseluruhan [9] [10]. Kombinasi perhitungan empiris, simulasi jaringan, dan pemodelan CFD kini dianggap sebagai praktik terbaik dalam perancangan ventilasi modern, karena memberikan akurasi lebih tinggi dan memungkinkan optimasi energi [2] [6] [11].

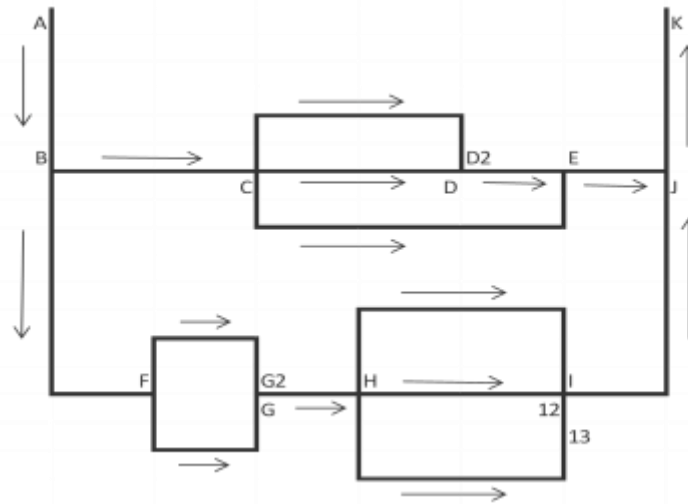
Berdasarkan perkembangan tersebut, penelitian ini memfokuskan kajian pada pengaruh variasi ukuran bukaan regulator terhadap debit udara dan resistansi dalam jaringan ventilasi tambang. Analisis teoritis menggunakan persamaan *McPherson* sebagai pendekatan empiris yang telah terbukti andal untuk menghitung resistansi berdasarkan geometri bukaan [1] [4]. Hasil perhitungan teori kemudian divalidasi dengan data laboratorium dan simulasi jaringan menggunakan simulasi perangkat lunak. Fokus khusus diberikan pada perbandingan bentuk bukaan lingkaran dan kotak untuk mengidentifikasi karakteristik aliran serta besaran resistansi yang dihasilkan pada setiap variasi luas bukaan.

2. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan melalui kombinasi eksperimen laboratorium, perhitungan teoritis, dan simulasi jaringan. Model jaringan ventilasi dibuat dari pipa PVC yang dapat dilihat pada **Gambar 1** berdiameter 10,9 cm yang disusun menyerupai konfigurasi jaringan dua dimensi. Konfigurasi jaringan 2 dimensi dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 1. Model Jaringan Ventilasi



Gambar 2. Konfigurasi Jaringan Ventilasi

Kemudian pada masing-masing cabang memiliki ukuran panjang yang bervariasi yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Panjang masing-masing cabang

Branch	Panjang (m)	Branch	Panjang (m)
AB	1	FG	1.5
BC	0.5	FG2	1.5
BF	2	GH	0.5
CD	1	HI	2
CD2	2	HI2	1
CE	3	HI3	2
DE	1	IJ	2
EJ	0.5	JK	1

Alat yang digunakan terdiri dari *centrifugal fan*, *hot wire-anemometer*, dan regulator dengan bentuk lubang bukaan berbentuk lingkaran dan kotak yang dapat dilihat pada Gambar 3. *Fan blower* digunakan sebagai sumber tekanan untuk menghasilkan aliran udara yang stabil. Regulator ditempatkan pada salah satu cabang jaringan (posisi FG2) dan dirancang dapat diubah luas bukaannya untuk memperoleh beberapa nilai rasio luas bukaan terhadap luas saluran. Variasi yang diuji meliputi enam kondisi, yaitu 0,18; 0,23; 0,35; 0,45; 0,66; dan 0,91. Untuk setiap kondisi, data kecepatan udara pada masing-masing cabang diukur menggunakan *hot-wire anemometer*, kemudian debit udara dihitung berdasarkan kecepatan rata-rata dan luas penampang [12].



Gambar 3. Variasi lubang bukaan pada Regulator

Debit udara dihitung dengan persamaan kontinuitas:

$$Q = V \times A$$

dengan Q adalah debit udara (m^3/s), V adalah kecepatan rata-rata udara (m/s) hasil pengukuran, dan A adalah luas penampang saluran (m^2). Persamaan ini digunakan untuk menghitung debit udara pada setiap variasi bukaan regulator baik pada percobaan laboratorium maupun validasi terhadap simulasi jaringan.

Perhitungan teoritis resistansi regulator mengacu pada persamaan McPherson dengan memanfaatkan koefisien kontraksi (C_c) didapatkan berdasarkan bentuk dari permukaan lubang bukaan yang dapat dilihat pada **Gambar 4**. dan faktor kehilangan tekanan lokal (X). Untuk mencari nilai X dapat dicari menggunakan persamaan berikut:

$$X = \frac{1}{C_c^2} \left\{ \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right\}$$

Sedangkan hubungan dasar kehilangan tekanan lokal dapat dinyatakan dalam:

$$H_L = X \times \frac{v^2}{2g}$$

di mana H_L adalah kehilangan tekanan (m), V adalah kecepatan udara (m/s), g adalah percepatan gravitasi (m/s^2), dan X adalah *shock-loss factor* yang diperoleh dari tabel empiris sesuai bentuk regulator [1], [4].

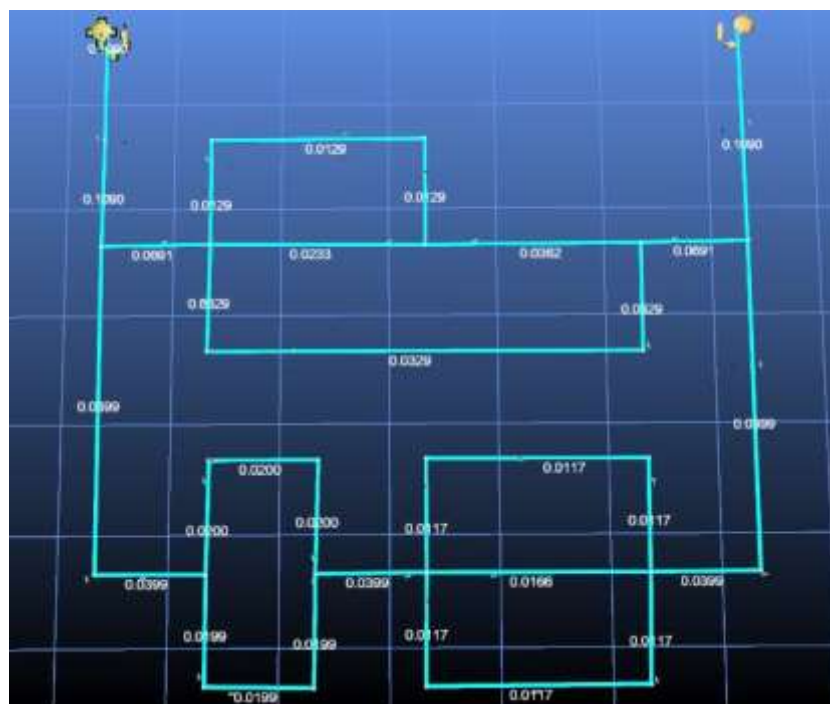
Selanjutnya, resistansi regulator (R) dihitung dengan persamaan Atkinson:

$$R = \frac{H_L}{Q^2}$$

dengan Q adalah debit udara (m^3/s). Nilai R (Ns^2/m^8) memberikan besaran resistansi yang dapat dibandingkan antara setiap kondisi rasio lubang bukaan.

Koefisien kontraksi (C_c) dan nilai X ditentukan berdasarkan bentuk dan dimensi bukaan regulator. Untuk regulator berbentuk lingkaran, nilai C_c cenderung lebih tinggi sehingga menghasilkan X yang lebih kecil dibandingkan regulator berbentuk kotak. Perhitungan ini memberikan estimasi teoritis resistansi yang kemudian dibandingkan dengan hasil pengujian laboratorium untuk menilai tingkat kesesuaian metode *McPherson*.

Sebagai tahap validasi, hasil perhitungan teori dibandingkan dengan simulasi jaringan menggunakan perangkat lunak *Ventsim Visual* dimana salah satu contoh simulasi yang dilakukan dapat dilihat pada **Gambar 4**. Simulasi ini dilakukan dengan memasukkan data geometri jaringan, kondisi fan, serta nilai bukaan regulator yang sesuai dengan pengaturan eksperimen. *Ventsim Visual* dipilih karena kemampuannya dalam memodelkan sistem ventilasi tambang tiga dimensi, serta akurasi yang telah diuji pada berbagai penelitian sebelumnya [9] [10] [13]. Perbandingan hasil perhitungan teori, data laboratorium, dan hasil simulasi digunakan untuk mengevaluasi sejauh mana uji laboratorium mampu merepresentasikan fenomena aliran pada berbagai variasi bukaan regulator [14] [15].



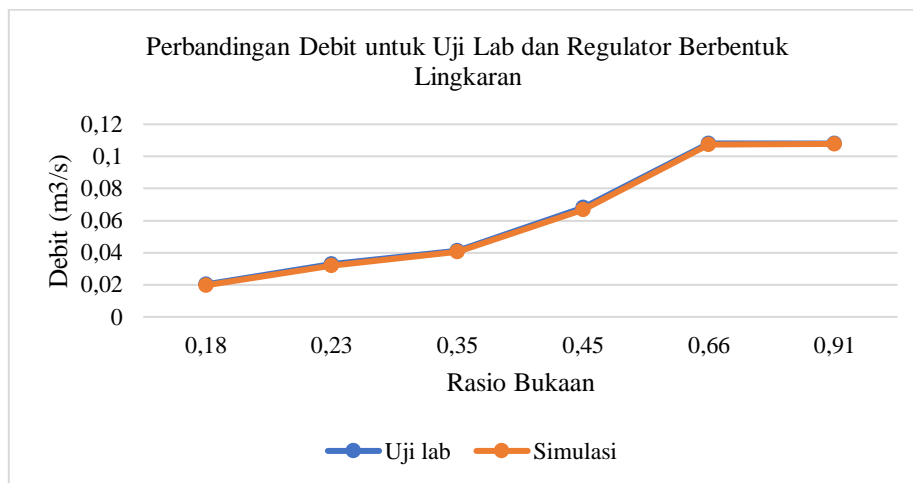
Gambar 4. Simulasi menggunakan perangkat lunak

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengukuran debit udara pada percobaan laboratorium dan simulasi perangkat lunak menunjukkan tren yang konsisten terhadap variasi rasio luas bukaan regulator yang datanya dapat dilihat pada **Tabel 2**.

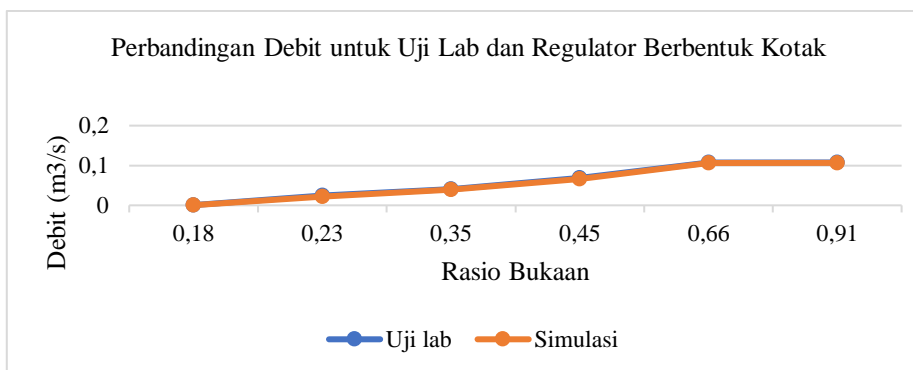
Tabel 2. Perbandingan debit udara untuk variasi rasio bukaan

Rasio bukaan	Debit udara regulator berbentuk lingkaran (m ³ /s)		Debit udara regulator bentuk kotak (m ³ /s)	
	Uji lab	Simulasi	Uji lab	Simulasi
0.18	0.0203	0.0197	0.0006	0.0003
0.23	0.0330	0.0320	0.0239	0.0225
0.35	0.0413	0.0407	0.0408	0.0395
0.45	0.0681	0.0669	0.0684	0.0662
0.66	0.1081	0.1073	0.1074	0.1060
0.91	0.1080	0.1078	0.1070	0.1065



Gambar 5. Grafik perbandingan nilai debit berbentuk lingkaran berdasarkan hasil uji dan simulasi

Secara umum, debit udara meningkat seiring dengan bertambahnya nilai rasio bukaan dan perbedaan antara hasil uji lab dan simulasi angkanya sangat kecil, baik pada regulator berbentuk lingkaran yang dapat dilihat pada **Gambar 5**. Sedangkan untuk regulator berbentuk kotak dapat dilihat pada **Gambar 6**.



Gambar 6. Grafik perbandingan nilai debit berbentuk kotak berdasarkan hasil uji dan simulasi

Hal ini sejalan dengan prinsip dasar mekanika fluida, di mana luas penampang efektif yang lebih besar menurunkan resistansi aliran dan memungkinkan volume udara yang lebih besar melewati regulator.

Data laboratorium menunjukkan bahwa pada bukaan kecil (rasio bukaan $\leq 0,25$), selisih debit antara laboratorium dan simulasi relatif lebih besar, berkisar 5–8%. Hal ini disebabkan oleh fenomena kontraksi vena (*vena contracta*) yang tidak sepenuhnya dimodelkan dalam perangkat lunak. Ketika aliran udara melewati bukaan sempit, efek turbulensi meningkat sehingga distribusi kecepatan udara menjadi tidak seragam. Perangkat lunak simulasi yang berbasis model jaringan ventilasi cenderung menggunakan koefisien kehilangan tekanan rata-rata, sehingga prediksi debit pada bukaan sangat kecil menjadi sedikit lebih rendah dibandingkan hasil pengukuran aktual.

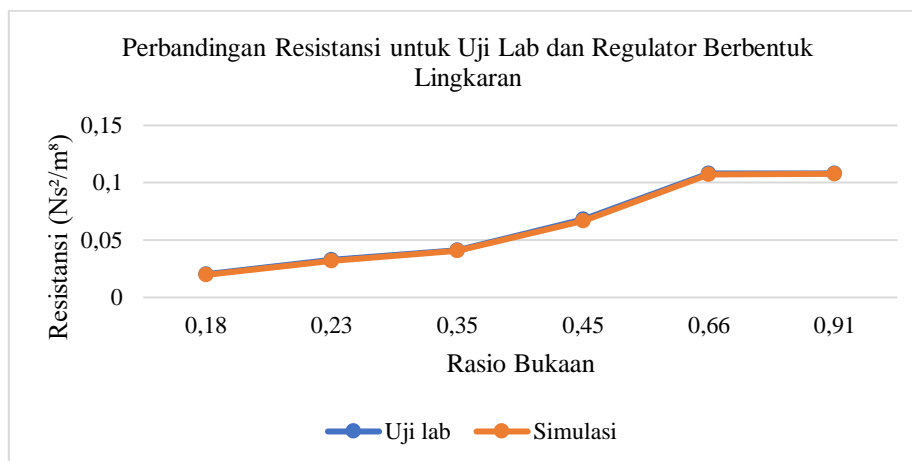
Pada bukaan menengah hingga besar (rasio bukaan $\geq 0,50$), perbedaan debit udara antara hasil laboratorium dan simulasi menurun menjadi sekitar 1–3%. Hal ini menunjukkan bahwa model simulasi perangkat lunak mampu merepresentasikan fenomena aliran dengan baik ketika efek turbulensi tidak terlalu dominan. Perbedaan yang kecil ini juga mengindikasikan bahwa perangkat lunak dapat diandalkan untuk estimasi awal debit udara dalam perancangan ventilasi tambang bawah tanah.

Hasil pengukuran nilai resistansi yang dihitung berdasarkan teori dari hasil laboratorium dan simulasi perangkat lunak ditampilkan pada **Tabel 3**.

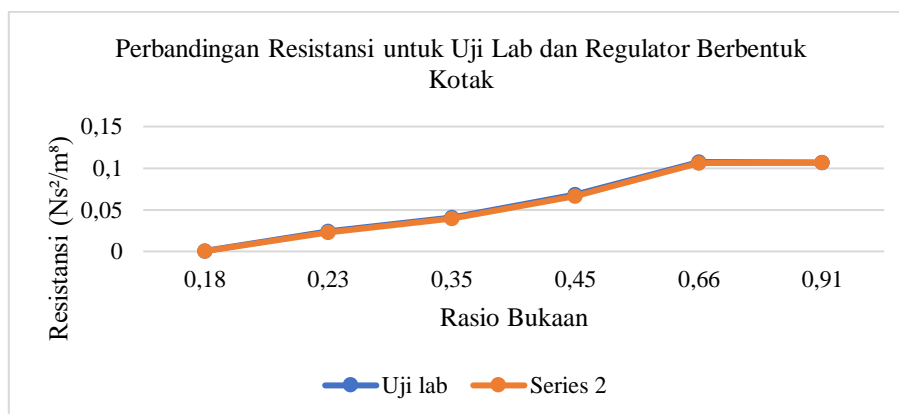
Tabel 3. Perbandingan resistansi untuk rasio lubang bukaan

Rasio bukaan	Resistansi regulator berbentuk lingkaran (Ns^2/m^8)		Resistansi regulator bentuk kotak (Ns^2/m^8)	
	Uji lab	Simulasi	Uji lab	Simulasi
0.18	0.0203	0.0197	0.0006	0.0003
0.23	0.0330	0.0320	0.0239	0.0225
0.35	0.0413	0.0407	0.0408	0.0395
0.45	0.0681	0.0669	0.0684	0.0662
0.66	0.1081	0.1073	0.1074	0.1060
0.91	0.1080	0.1078	0.1070	0.1065

Secara umum, resistansi menurun seiring bertambahnya rasio bukaan, baik pada regulator lingkaran maupun kotak. Pada bukaan sangat kecil (rasio bukaan = 0,18), resistansi tercatat paling tinggi, masing-masing lebih dari 3 Ns^2/m^8 untuk regulator lingkaran dan 3,6 Ns^2/m^8 untuk regulator kotak. Sebaliknya, pada bukaan mendekati penuh (rasio bukaan = 0,91), resistansi turun drastis hingga hanya sekitar 0,2–0,3 Ns^2/m^8 .



Gambar 7. Grafik perbandingan nilai resistansi regulator berbentuk lingkaran berdasarkan hasil uji dan simulasi



Gambar 8. Grafik perbandingan nilai resistansi regulator berbentuk kotak berdasarkan hasil uji dan simulasi

Hasil perbandingan nilai resistansi untuk regulator berbentuk lingkaran dan kotak yang dapat dilihat pada **Gambar 7** dan **Gambar 8**, menunjukkan bahwa perhitungan dengan uji laboratorium memberikan prediksi resistansi yang sangat mendekati hasil simulasi perangkat lunak untuk semua variasi rasio bukaan, baik pada regulator lingkaran maupun kotak. Selisih rata-rata berkisar 2–4%, yang secara praktis dapat diabaikan dalam perancangan ventilasi tambang.

Deviasi yang sedikit lebih besar pada bukaan terbesar (rasio bukaan = 0,91) dapat disebabkan oleh sensitivitas pengukuran pada resistansi yang sangat rendah. Pada kondisi ini, kesalahan kecil dalam pengukuran tekanan atau kecepatan udara dapat menghasilkan perbedaan persentase yang tampak signifikan meskipun perbedaan absolutnya sangat kecil.

Secara fisik, kesesuaian tinggi antara perhitungan dan simulasi mengindikasikan bahwa parameter koefisien kontraksi dan faktor kehilangan tekanan yang digunakan dalam teori mampu mewakili perilaku aliran udara aktual pada regulator tambang. Temuan ini mendukung penggunaan persamaan *McPherson* sebagai acuan utama dalam tahap perancangan awal, sementara simulasi perangkat lunak dapat digunakan sebagai alat validasi untuk memeriksa hasil perhitungan dan mengevaluasi skenario operasi yang lebih kompleks.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi ukuran dan bentuk bukaan regulator memiliki pengaruh yang nyata terhadap kinerja sistem ventilasi tambang, khususnya pada debit udara dan resistansi aliran. Peningkatan rasio luas bukaan terbukti mampu menurunkan resistansi lokal secara signifikan sekaligus meningkatkan debit udara pada jaringan ventilasi. Regulator berbentuk kotak menghasilkan resistansi yang lebih besar dibandingkan regulator berbentuk lingkaran, terutama pada kondisi bukaan kecil, sehingga menurunkan kuantitas aliran udara yang melewati saluran. Namun, pada bukaan menengah hingga besar, perbedaan resistansi antara kedua bentuk regulator menjadi semakin kecil dan cenderung tidak signifikan. Perhitungan menggunakan persamaan *McPherson* memberikan hasil yang sejalan dengan pengujian laboratorium dan simulasi jaringan menggunakan perangkat lunak pada variasi bukaan menengah hingga besar, sehingga dapat dijadikan acuan yang andal dalam tahap perancangan awal sistem ventilasi tambang. Temuan ini menegaskan bahwa pemilihan ukuran dan bentuk bukaan regulator merupakan faktor teknis yang krusial dalam mengoptimalkan distribusi udara serta efisiensi energi pada jaringan ventilasi bawah tanah.

5. Saran

Penggunaan regulator dengan bukaan sangat kecil sebaiknya dihindari karena berpotensi menghasilkan deviasi perhitungan yang tinggi dan risiko ketidakcukupan debit udara. Desain ventilasi tambang disarankan memadukan metode perhitungan, simulasi jaringan, dan pengujian lapangan untuk memperoleh hasil yang lebih akurat dan andal.

6. Daftar Referensi

- [1] M. J. McPherson, *Subsurface Ventilation and Environmental Engineering*. Springer, 1993. doi: 10.1007/978-94-011-1550-6.
- [2] Y. Xue and others, "Bibliometric analysis and review of mine ventilation research (2010–2023)," *Sci. Total Environ.*, vol. 906, 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.167732.
- [3] H. Yi and others, "Applications of computational fluid dynamics for mine ventilation: A review," *Energies*, vol. 15, no. 22, 2022, doi: 10.3390/en15228405.
- [4] H. Zhang and others, "An application of CFD to predict shock loss factors at raise junctions in underground mine ventilation systems," *Mining, Metall. Explor.*, 2024, doi: 10.1007/s42461-024-00984-6.
- [5] P. Tukkaraja and S. Bhamidipati, "Estimation of shock loss factors at shaft bottom junction using CFD," *Mining, Metall. Explor.*, vol. 36, no. 5, pp. 1107–1119, 2019, doi: 10.1007/s42461-019-0099-x.
- [6] P. Cao and others, "Inversion of mine ventilation resistance coefficients enhanced by deep reinforcement learning," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 182, 2024, doi: 10.1016/j.psep.2023.12.005.
- [7] L. Liu and others, "Mine ventilation system reliability evaluation based on a Markov chain," *Sci. Rep.*, vol. 12, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-22098-z.
- [8] J. Qian and others, "CFD modeling of ventilation and dust flow behavior in dead-end drifts of underground mines," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, no. 16, 2020, doi: 10.3390/ijerph17166006.
- [9] S. Maleki and others, "Application of VENTSIM 3D and mathematical programming to optimize underground mine ventilation: a case study," *J. Min. Environ.*, vol. 9, no. 2, 2018, doi: 10.22044/jme.2018.6793.1503.
- [10] B. Yu and others, "Energy-saving optimization of mine ventilation system using nonlinear programming," *Front. Energy Res.*, vol. 10, 2022, doi: 10.3389/fenrg.2022.892345.
- [11] M. Semin and L. Levin, "Mathematical modeling of air distribution in mines considering different ventilation modes," *Mathematics*, vol. 11, no. 15, 2023, doi: 10.3390/math11150889.

-
- [12] X. Pei and others, "Experimental study on ventilation supply control in deep mines," *Int. J. Min. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 5, 2020, doi: 10.1016/j.ijmst.2020.05.013.
- [13] D. J. Brake, "Fire modelling in underground mines using Ventsim VENTFIRE," *Min. Technol.*, vol. 128, no. 4, 2019, doi: 10.1080/25726668.2019.1686553.
- [14] G. Danko and others, "Dynamic models in atmospheric monitoring for underground mines," *Mining, Metall. Explor.*, vol. 37, 2020, doi: 10.1007/s42461-019-0099-x.
- [15] D. Chen and others, "CFD modelling of ventilation optimization for improving mine air quality," *J. Clean. Prod.*, vol. 389, 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136164.