

Model Validasi Ukuran Droplet Batuk Dalam Ruangan Menggunakan Pendekatan Multicomponent Eulerian -Lagrangian

Mohammad Muslimin^{*1)}, Atika Isnaining Dyah^{*2)}, Luthfi Hakim^{*3)}

^{*1,2,3)}Universitas Islam Majapahit, Mojokerto
hakimunim@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini dilakukan secara numerik menggunakan pendekatan *Multicomponent- Eulerian-Lagrangian* untuk melihat medan aliran udara dan pola penyebaran droplet aerosol dalam ruangan. Pola penyebaran dan perubahan ukuran droplet diprediksi secara akurat dengan bantuan software CFD komersial. Melalui pendekatan *Multicomponent- Eulerian-Lagrangian* udara basah diperlakukan sebagai campuran ideal antara udara kering dengan uap air. Sedangkan droplet yang dikeluarkan dari seseorang ketika batuk diasumsikan terdiri dari 98% air dan 2% partikel padat yang tidak dapat menguap. Simulasi dilakukan pada kondisi kelembapan udara 50% dan didasarkan pada aktivitas seseorang ketika batuk, dengan kecepatan droplet saat keluar sumber adalah 10 m/s. Variasi ukuran droplet mula-mula adalah 10 μm dan 100 μm . Karena mengalami evaporasi, diameter droplet mula-mula akan mengalami pengurangan ukuran hingga 21% menjadi 2,1 μm dan 21,03 μm membentuk inti droplet (*droplet nuclei*). Selain itu, hasil simulasi menunjukkan sebaran droplet melalui *particle residence time* dan lintasan partikel dalam ruangan. Sehingga mampu memprediksi pola penyebaran droplet yang ada dalam ruangan.

Kata Kunci: droplet, evaporasi, inti droplet, CFD.

Abstract

This research employs a numerical approach using the Multicomponent-Eulerian-Lagrangian method to investigate the airflow patterns and dispersion characteristics of aerosol droplets within an enclosed space. Accurate prediction of droplet dispersion and size variation is achieved through the utilization of commercial CFD software. Within the framework of the Multicomponent-Eulerian-Lagrangian approach, moist air is treated as an ideal mixture of dry air and water vapor. Meanwhile, droplets expelled during a cough are assumed to comprise 98% water and 2% non-vaporizable solid particles. Simulations are conducted under 50% relative humidity conditions, reflecting human coughing activity, with an initial droplet velocity of 10 m/s upon release. Initial droplet sizes vary between 10 μm and 100 μm . As a result of evaporation, the initial droplet diameter experiences a reduction of up to 21%, leading to sizes of 2.1 μm and 21.03 μm , forming droplet nuclei. Furthermore, simulation outcomes reveal droplet dispersion patterns through particle residence time and trajectories within the enclosed space, enabling the prediction of droplet spreading patterns within the environment.

Keywords: Droplet, Evaporation, droplet nuclei, CFD

Pendahuluan

Wabah influenza (H₁N₁) yang terjadi pada bulan maret 2009, SARS (Severe Acute Respiratory Syndrome) pada bulan November 2002-2003, influenza yang disebabkan oleh virus influenza, dan baru-baru ini covid-19 yang disebabkan oleh virus corona (SARS-CoV-2) telah mengingatkan kepada kita bahwa penyakit menular melalui udara tetap menjadi masalah yang serius dan dapat mengancam kesehatan manusia. Pola penyebarannya dapat melalui droplet atau partikel kecil yang tersebar diudara. Ada bukti yang cukup kuat untuk menunjukkan antara ventilasi udara dalam ruangan terhadap penularan penyakit yang menyebar melalui udara(Ascione et al., 2021; Y. Li et al., 2007; Sheikhejad et al., 2022). Misalnya, SARS-Cov-2. Penularan SARS-Cov-2 dapat terjadi melalui kontak dengan orang yang terinfeksi, melalui infeksi pernafasan seperti sekresi pernafasan, percikan air liur (droplet) dari orang yang terinfeksi(Chan et al., 2020; Ghinai et al., 2020; Liu et al., 2020). Tetesan air liur yang berukuran diameter $\leq 5\mu m$ disebut droplet nuclei atau aerosol (WHO, 2014). Penularan virus corona dapat terjadi secara langsung melalui kontak atau bersentuhan dengan orang yang terinfeksi dan secara tidak langsung melalui kontak dengan permukaan yang sebelumnya disentuh oleh orang yang terinfeksi bahkan bisa melalui droplet yang dikeluarkan dari orang yang terinfeksi (Morawska, 2006; Morawska & Cao, 2020). Penularan melalui udara dapat digambarkan sebagai penyebaran agen pembawa virus melalui proses exhalation dan inhalation. Penguapan dari sejumlah droplet menghasilkan microscopic aerosol sedangkan bernafas dan berbicara menghasilkan exhaled aerosol. Oleh karena itu, orang yang rentan dapat menghirup aerosol dan beresiko terinfeksi virus (Gratton et al., 20013; Santarpia et al., 2020).

(Kao & Yang, 2006) membuat model CFD batuk dan mensimulasikan penyebaran droplet (cipratan liur) dengan virus pada ruang isolasi di rumah sakit. (Lim et al., 2010a, 2010b) menganalisis karakteristik virus di udara menggunakan metode tracer gas dan CFD coupled. (Ascione et al., 2021) mendesain ruang kelas yang aman dalam menghadapi penyebaran dan penularan penyakit menggunakan pendekatan CFD simulati dan (D. Li et al., 2009) meneliti tentang ventilasi alami digedung sekolah menggunakan CFD. (Zhu et al., 2010) mensimulasikan aliran udara dalam bus dan menganalisis pengaruh ventilasi terhadap konsentrasi polutan pembawa penyakit menular. (Yang et al., 2019) menganalisis pola aliran udara dan menganalisis pengaruh bukaan jendela terhadap

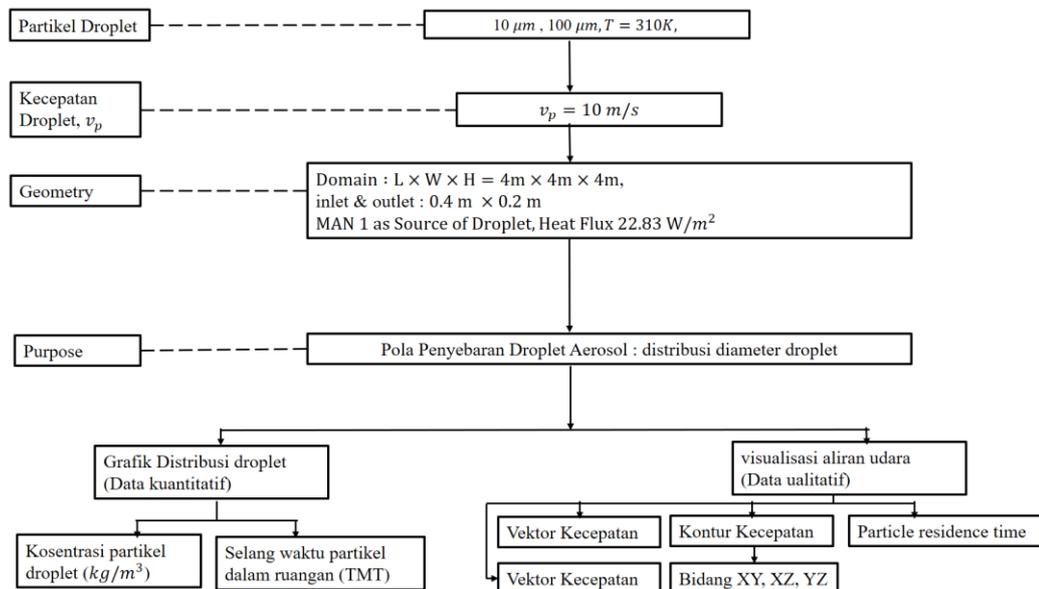
laju ventilasi. (Wang et al., 2021) mempelajari distribusi udara droplet (percikan air liur) dari batuk seseorang dalam kereta cepat. (Knibbs et al., 2012) mempelajari penularan virus pada mobil penumpang.

Dengan mempertimbangkan berbagai mekanisme penularan *pathogen* yang terjadi melalui droplet aerosol, maka penelitian yang akan dilakukan mencoba meneliti tentang sebaran droplet yang dikeluarkan ketika seseorang batuk. Simulasi dilakukan secara *steady* terhadap beberapa skenario pengaturan sistem ventilasi udara (pengaturan *inlet* dan *outlet*), sehingga didapatkan kondisi ruangan yang relatif aman dari penularan virus melalui udara. Penularan paling kecil terjadi ketika partikel virus SAR COV-2 menempuh lintasan terpendek dan membutuhkan waktu yang relatif singkat untuk keluar ruangan (Arjmandi et al., 2022). Selain itu, rata-rata konsentrasi partikel berkurang seiring berjalannya waktu dan berbanding terbalik dengan kecepatan ventilasi udara dalam ruang kelas. Semakin tinggi kecepatan ventilasi udara, maka semakin rendah jumlah rata-rata konsentrasi droplet dalam ruang kelas (Mirzaie et al., 2021).

Metode

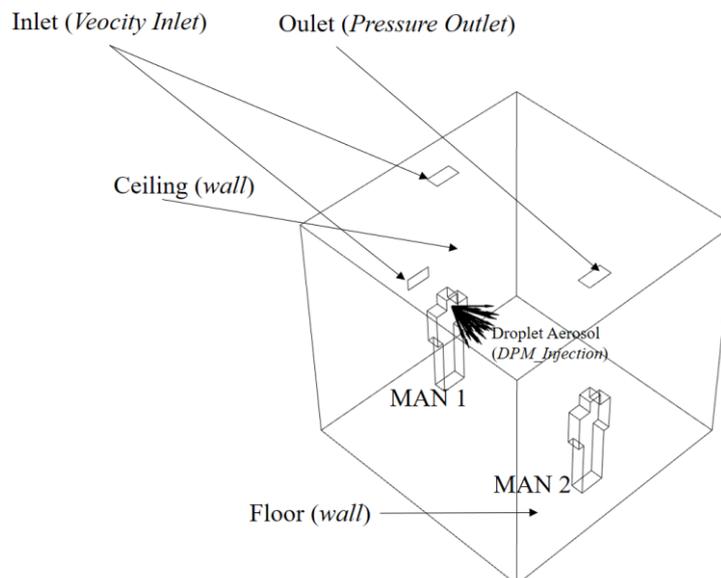
Penelitian dilakukan secara simulasi menggunakan bantuan CFD komersial dengan pendekatan Eulerian_Lagrangian dalam kondisi *steady*. Metode tersebut dipilih untuk menyelesaikan *case* distribusi aerosol droplet (media penularan covid-19) dalam ruangan yang berukuran $4\text{ m} \times 4\text{ m} \times 4\text{ m}$. Posisi Sumber droplet ($X = 0.7; Y = 1.62; Z = 2$) tepat menunjukkan posisi mulut pada orang dewasa ketika berdiri dengan tinggi 1.8 m . Rangkuman dari seluruh pemodelan distribusi dan penularan droplet aerosol disajikan dalam bentuk diagram kerangka penelitian sebagai berikut (Gambar. 1).

Berdasarkan Gambar 1 droplet aerosol diasumsikan sebagai partikel yang berukuran $100\ \mu\text{m}$, $\dot{m} = 1.2566 \times 10^{-6}\ \text{kg/s}$ dengan kecepatan $10\ \text{m/s}$ (Mirzaie et al., 2021). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Diwan et al., 2020) ukuran droplet dari orang bersin/batuk dikelompokkan kedalam tiga ukuran: (1) *small droplet* ($< 10\ \mu\text{m}$) mengikuti aliran fluida (*streamline*), (2) *moderate-sized droplets* ($10\ \mu\text{m} \leq 100\ \mu\text{m}$) terpengaruh oleh gaya inersia dan gaya gravitasi, (3) *large droplets* ($> 100\ \mu\text{m}$) dibawah pengaruh gravitasi. Partikel tersebut diasumsikan keluar dari sumber (mulut orang ke-1) dalam bentuk sudut dan menyebar keseluruh ruangan.



Gambar 1. Skema ringkasan penelitian

Kondisi batas (*Boundary Conditions*) merujuk pada cara bagaimana aliran fluida diatur dengan kondisi atau batasan-batasan dalam domain simulasi. Kondisi batas sangat penting dalam simulasi ini, karena dapat mempengaruhi interaksi antara fluida dengan kondisi permukaan yang diatur dalam domain simulasi. Kondisi batas penelitian ini terlihat pada gambar 2 sebagai berikut.



Gambar. 2 Kondisi batas dari domain simulasi

Berdasarkan Gambar 2. telah ditetapkan no-slip dan trap *Boundary condition* untuk seluruh permukaan, termasuk dinding, dan orang yang berada dalam ruangan sebagai *wall*. Pada

inlet ditetapkan kecepatan *velocity inlet* sedangkan *outlet* adalah *pressure outlet*. intensitas turbulensi 10% (dengan *turbulen length scale* 0.02 m). Sumber virus didefinisikan sebagai DPM (*Droplet*) yang diinjeksikan dari mulut MAN 1.

Hasil dan Pembahasan

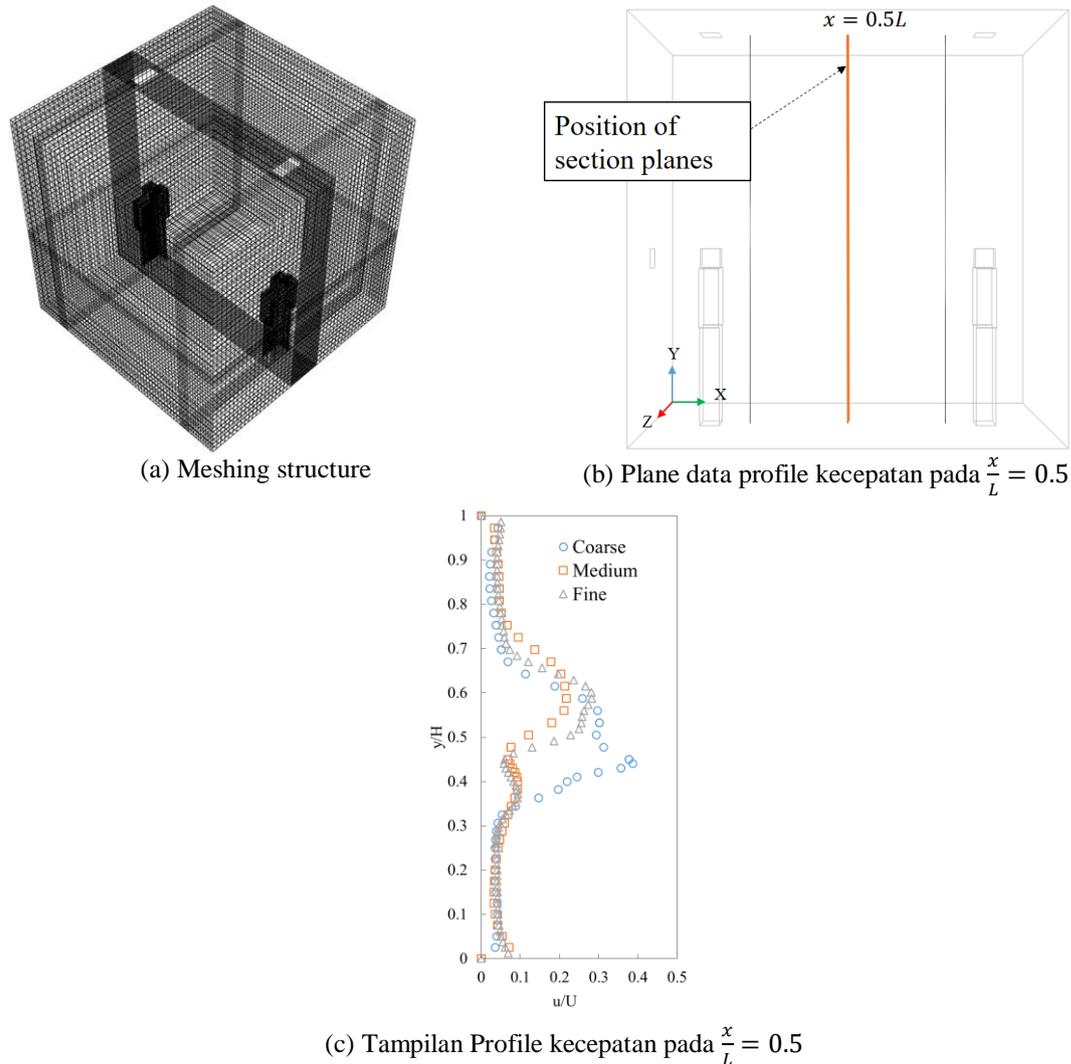
Hasil Uji Grid Independensi

Untuk memastikan bahwa hasil simulasi tidak lagi bergantung pada jumlah mesh, maka dilakukan uji grid independensi tanpa adanya droplet. Jumlah mesh dipilih dengan mempertimbangkan tiga jenis mesh, mesh kasar (*coarse*), menengah (*medium*), rapat (*fine*). Hasil uji grid independensi dipilih mesh jenis *medium*, mesh tersebut dipilih untuk selanjutnya digunakan sebagai parameter penentuan meshing, Seperti yang terlihat pada Table 1.

Tabel 1. Uji Grid Independensi

Jenis Mesh	Total Elemen	y/H	Z	x/L	Rata_rata (u/U)	Relative error (%)
<i>coarse</i>	87740	0.5	2	0.5	0.498	
<i>medium</i>	215880	0.5	2	0.5	0.476	0
<i>fine</i>	831460	0.5	2	0.5	0.492	3.33

Simulasi dilakukan dengan setiap variasi grid yang telah ditentukan sebelumnya. Data profil kecepatan udara (\mathbf{u}/U) digunakan sebagai kondisi awal untuk simulasi, dan aliran udara dalam ruangan direkonstruksi berdasarkan parameter-parameter yang relevan. Berdasarkan Gambar 3 (c) profil kecepatan udara tidak mengalami perubahan yang signifikan saat ukuran grid diperhalus, ini menunjukkan adanya konvergensi. Dalam hal ini, hasil simulasi sudah cukup stabil dan tidak lagi bergantung pada grid yang lebih halus. Hasil uji grid independensi memperlihatkan profil kecepatan pada posisi $\frac{x}{L} = 0.5$ seperti yang terlihat pada gambar 4 sebagai berikut.

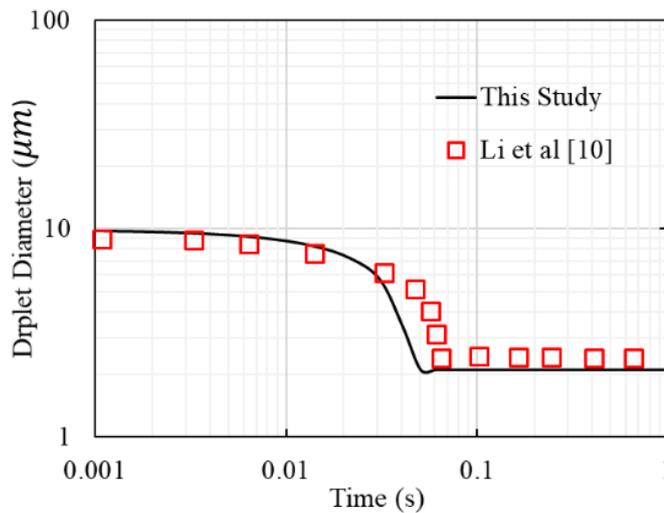


Gambar 3. (a) Jenis Meshing dari domain simulasi (b) Plane data profile kecepatan dan (d) Tampilan Profile kecepatan

Hasil Validasi Ukuran Droplet

Validasi ukuran droplet yang dikeluarkan dari sumber batuk berdiameter mula-mula $10 \mu m$ kemudian akan mengalami penurunan diameter hingga membentuk inti droplet. Validasi tersebut dibandingkan dengan penelitian yang telah dilakukan oleh (X. Li et al., 2018). Penurunan diameter droplet sangat diengaruhi oleh kelembapan relatif udara sekitar. Kelembapan relatif penelitian ditentukan sebesar 0%. Namun, Namun untuk selanjutnya, penelitian ini akan dilakukan pada kelembapan relatif 50%. Kondisi kelembapan relatif 50% mencerminkan kisaran yang umum terjadi dalam lingkungan sehari-hari. Hal ini ditentukan karena dapat membantu dalam memahami bagaimana

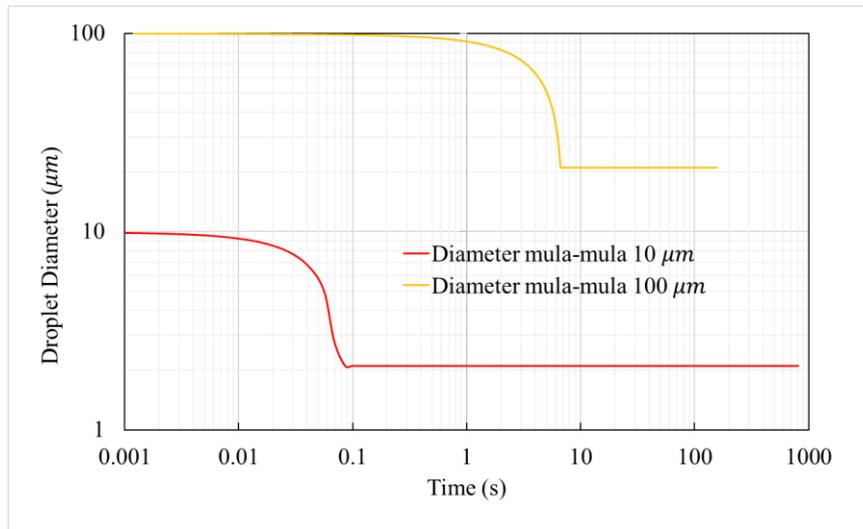
droplet batuk atau bersin akan berperilaku dalam kondisi normal. Hasil validasi diperlihatkan pada Gambar 4 sebagai berikut.



Gambar 4 Model validasi ukuran droplet dengan diameter mula-mula $10\mu\text{m}$ pada kondisi kelembapan relatif 0%.

Berdasarkan Gambar 4 bahwa Studi CFD ini telah divalidasi dengan membandingkan hasilnya dengan penelitian yang dilakukan oleh (X. Li et al., 2018). Validasi dilakukan pada penguapan droplet yang dikeluarkan selama batuk. Droplet memiliki ukuran $10\mu\text{m}$ dan laju aliran massa sebesar $5.24 \times 10^{-11} \text{Kgs}^{-1}$ dalam kondisi kelembapan relatif 0%. Perbandingan yang ditunjukkan dalam gambar 4 menunjukkan temuan yang konsisten antara studi ini dan yang dilakukan oleh (X. Li et al., 2018). Selain itu, perbedaan yang diamati berada dalam rentang 1%.

Gambar 5 memperlihatkan Variasi diameter droplet mula-mula $10\mu\text{m}$ dan $100\mu\text{m}$. Pengurangan ukuran diameter droplet dari ukuran awal $10\mu\text{m}$ dan $100\mu\text{m}$ menjadi $2.1\mu\text{m}$ dan $21.03\mu\text{m}$ secara berurutan adalah hasil dari proses evaporasi yang terjadi. Evaporasi adalah proses di mana air pada permukaan droplet berubah menjadi uap air di lingkungan sekitarnya. Saat droplet terbentuk, bagian air di permukaannya akan terus menguap ke udara di sekitarnya yang cenderung lebih kering. Proses ini menyebabkan penurunan massa droplet seiring waktu dan, karena ukuran droplet umumnya berbanding lurus dengan massa, ukuran diameter droplet pun mengalami penyusutan.



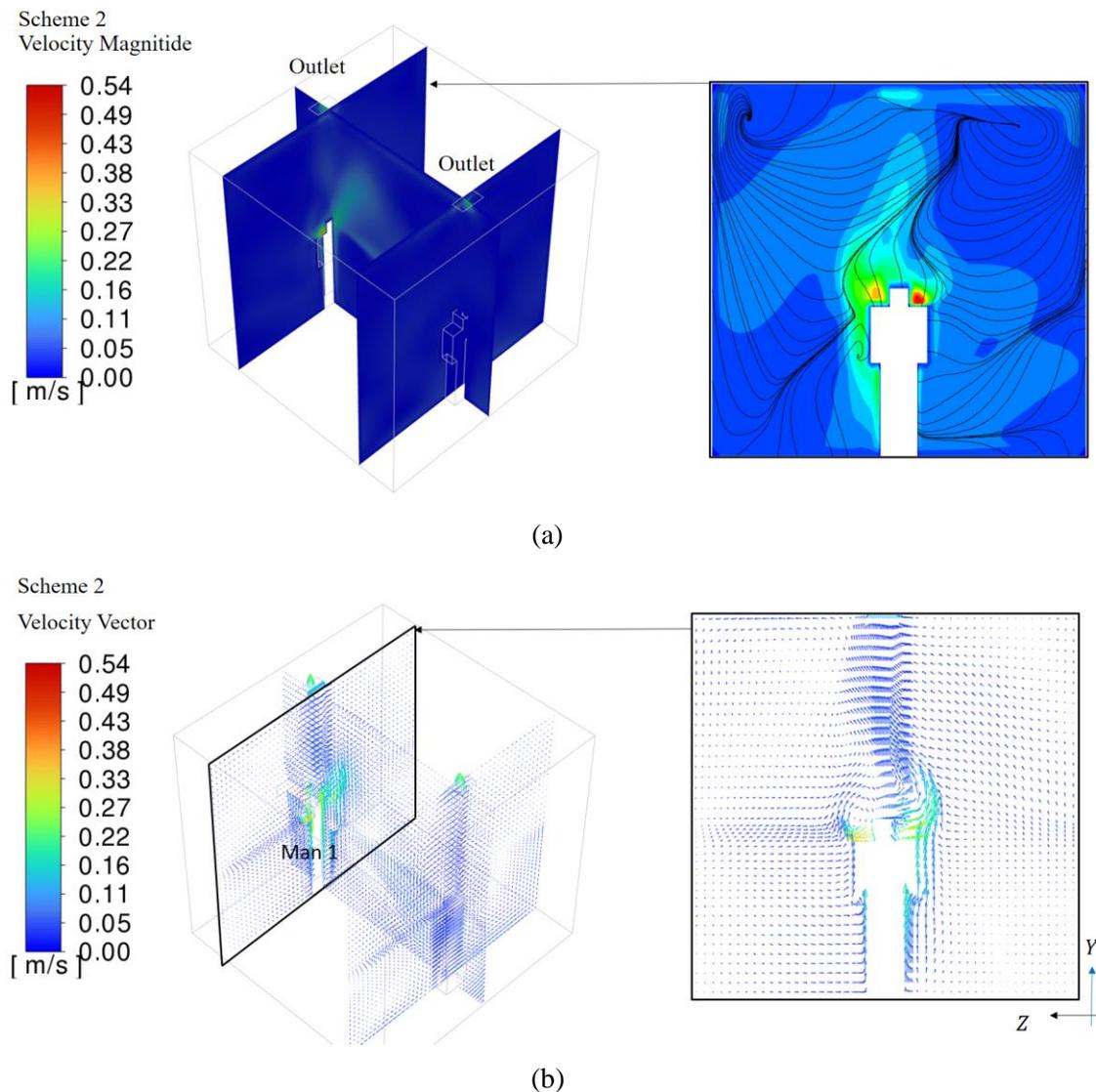
Gambar 5. Penurunan ukuran diameter droplet akibat evaporasi

Droplet yang berasal dari batuk seseorang mengalami penurunan diameternya karena mengalami evaporasi, hal tersebut dapat dijelaskan melalui prinsip-prinsip mekanika fluida. Evaporasi terjadi ketika molekul-molekul air di permukaan droplet mendapatkan energi dari lingkungan sekitarnya yang lebih kering dan bergerak dengan cukup cepat sehingga mereka dapat melepaskan ikatan dengan droplet dan menjadi uap air. Ukuran mula-mula partikel droplet, atau diameter awalnya, memiliki dampak langsung pada luas permukaan relatif terhadap volumenya. Dalam hal ini, droplet dengan diameter lebih besar memiliki luas permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan droplet yang lebih kecil, relatif terhadap volumenya. Oleh karena itu, droplet yang lebih besar memiliki lebih banyak molekul air di permukaannya yang dapat menguap secara bersamaan. Ketika droplet yang lebih besar mengalami evaporasi, jumlah molekul air yang menguap lebih besar dan perubahan ukuran droplet menjadi lebih terlihat. Ini karena evaporasi terjadi dari seluruh permukaan droplet yang luas. Seiring waktu, ukuran droplet yang lebih besar cenderung lebih cepat menyusut dan mengalami perubahan ukuran yang lebih signifikan dibandingkan dengan droplet yang lebih kecil.

Sebaliknya, droplet yang lebih kecil memiliki luas permukaan relatif yang lebih rendah terhadap volumenya. Ini berarti bahwa mereka memiliki jumlah molekul air di permukaan yang lebih sedikit yang dapat menguap dalam satu waktu. Oleh karena itu, proses evaporasi cenderung lebih lambat dan perubahan ukuran yang diamati mungkin tidak sebesar pada droplet yang lebih besar.

Hasil Kontur Kecepatan (*Velocity Magnitude*) dan vektor kecepatan (*velocity vektor*)

Kontur kecepatan (*velocity magnitude*) dan vektor kecepatan (*velocity vektor*) adalah dua aspek yang penting dalam analisis aliran fluida, termasuk dalam simulasi pergerakan droplet di ruangan. Gambar 5 memperlihatkan gambaran dari keduanya.



Gambar 5 (a) Kontur kecepatan udara yang bersumber dari inlet, (b) Vektor kecepatan pada bidang Y-Z

Kontur kecepatan menggambarkan distribusi kecepatan fluida di seluruh wilayah yang dianalisis. Pada kontur kecepatan, setiap titik dalam wilayah diberi warna yang menggambarkan magnitude (besar) kecepatan fluida di titik tersebut. Ini memungkinkan kita melihat bagaimana kecepatan berubah di berbagai bagian ruangan. Area dengan

warna yang lebih terang menunjukkan kecepatan yang lebih tinggi, sedangkan area dengan warna yang lebih gelap menunjukkan kecepatan yang lebih rendah (Gambar 5(a)).

Vektor kecepatan adalah representasi visual dari arah dan besarnya kecepatan fluida di setiap titik dalam ruangan. Ini biasanya ditunjukkan dengan panah yang panjang dan arahnya menunjukkan arah aliran fluida, sementara panjangnya menggambarkan besarnya kecepatan. Dengan vektor kecepatan, kita dapat melihat bagaimana arus udara bergerak dan berinteraksi di berbagai bagian ruangan (Gambar 5(b)).

Distribusi kecepatan udara dalam ruangan akan mempengaruhi pola pergerakan droplet. Daerah dengan kecepatan tinggi akan membantu droplet untuk menyebar lebih cepat, sementara daerah dengan kecepatan rendah akan menyebabkan droplet lebih lama tinggal dalam area tersebut. Arah vektor kecepatan akan menentukan jalur pergerakan droplet. Droplet akan mengikuti arus udara dan berpindah sesuai dengan arah aliran tersebut. Ini akan memengaruhi jalur dan pola penyebaran droplet dalam ruangan,

Simpulan dan Saran

Penelitian ini menerapkan pendekatan *Multicomponent-Eulerian-Lagrangian* secara numerik untuk menginvestigasi aliran udara dan pola dispersi droplet aerosol dalam ruangan. Hasil simulasi berhasil memprediksi dengan akurat pola dispersi dan perubahan ukuran droplet dengan bantuan perangkat lunak CFD komersial. Pendekatan *Multicomponent-Eulerian-Lagrangian* digunakan untuk memodelkan udara basah sebagai campuran ideal antara udara kering dan uap air. Dalam simulasi ini, droplet yang dihasilkan dari batuk diasumsikan terdiri dari 98% air dan 2% partikel padat yang tidak dapat menguap. Dengan kondisi lingkungan yang memiliki kelembapan udara sebesar 50%, simulasi dilakukan berdasarkan aktivitas batuk manusia dengan kecepatan droplet saat keluar sebesar 10 ms^{-1} dengan variasi ukuran awal droplet $10 \mu\text{m}$ dan $100 \mu\text{m}$. Hasil simulasi menunjukkan bahwa akibat evaporasi, diameter awal droplet mengalami penurunan hingga 21%, membentuk inti droplet dengan diameter $2.1 \mu\text{m}$ dan $21.03 \mu\text{m}$. Hasil simulasi juga memaparkan sebaran droplet melalui waktu tinggal partikel dan lintasan dalam ruangan. Selain itu, Kombinasi informasi dari kontur kecepatan dan vektor kecepatan akan memberikan wawasan yang lebih lengkap tentang bagaimana aliran udara akan membawa dan mendistribusikan droplet dalam ruangan. Informasi ini sangat

penting dalam memahami risiko penyebaran droplet yang dapat mengandung partikel infeksius seperti virus.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kepada DRTPM –DIKTI dan LLDIKTI VII melalui kontrak penelitian no. 183/E5/P.G.02.00.PL/2023 penelitian ini dapat terlaksana.

Daftar Pustaka

- Arjmandi, H., Amini, R., khani, F., & Fallahpour, M. (2022). Minimizing the respiratory pathogen transmission: Numerical study and multi-objective optimization of ventilation systems in a classroom. *Thermal Science and Engineering Progress*, 28(August 2021), 101052. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.101052>
- Ascione, F., De Masi, R. F., Mastellone, M., & Vanoli, G. P. (2021). The design of safe classrooms of educational buildings for facing contagions and transmission of diseases: A novel approach combining audits, calibrated energy models, building performance (BPS) and computational fluid dynamic (CFD) simulations. *Energy and Buildings*, 230, 110533. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110533>
- Chan, J. F. W., Yuan, S., Kok, K. H., To, K. K. W., Chu, H., Yang, J., Xing, F., Liu, J., Yip, C. C. Y., Poon, R. W. S., Tsoi, H. W., Lo, S. K. F., Chan, K. H., Poon, V. K. M., Chan, W. M., Ip, J. D., Cai, J. P., Cheng, V. C. C., Chen, H., ... Yuen, K. Y. (2020). A familial cluster of pneumonia associated with the 2019 novel coronavirus indicating person-to-person transmission: a study of a family cluster. *The Lancet*, 395(10223), 514–523. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30154-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30154-9)
- Diwan, S. S., Ravichandran, S., Govindarajan, R., & Narasimha, R. (2020). Understanding Transmission Dynamics of COVID-19-Type Infections by Direct Numerical Simulations of Cough/Sneeze Flows. *Transactions of the Indian National Academy of Engineering*, 5(2), 255–261. <https://doi.org/10.1007/s41403-020-00106-w>
- Ghinai, I., McPherson, T. D., Hunter, J. C., Kirking, H. L., Christiansen, D., Joshi, K., Rubin, R., Morales-Estrada, S., Black, S. R., Pacilli, M., Fricchione, M. J., Chugh, R. K., Walblay, K. A., Ahmed, N. S., Stoecker, W. C., Hasan, N. F., Burdsall, D. P.,

- Reese, H. E., Wallace, M., ... Layden, J. E. (2020). First known person-to-person transmission of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) in the USA. *The Lancet*, 395(10230), 1137–1144. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30607-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30607-3)
- Gralton, J., Tovey, E. R., McLaws, M.-L., & Rawlinson, W. D. (20013). Respiratory Virus RNA Is Detectable in Airborne and Droplet Particles. *Journal of Medical Virology*, 55(November 2005), 52–55. <https://doi.org/10.1002/jmv>
- Kao, P. H., & Yang, R. J. (2006). Virus diffusion in isolation rooms. *Journal of Hospital Infection*, 62(3), 338–345. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2005.07.019>
- Knibbs, L. D., Morawska, L., & Bell, S. C. (2012). The risk of airborne influenza transmission in passenger cars. *Epidemiology and Infection*, 140(3), 474–478. <https://doi.org/10.1017/S0950268811000835>
- Li, D., Yan, W., Zhang, Y., & Sun, Y. (2009). Experimental and CFD study of unsteady airborne pollutant transport within an aircraft cabin mock-up. *Building and Environment*, 44(1), 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.01.010>
- Li, X., Shang, Y., Yan, Y., Yang, L., & Tu, J. (2018). Modelling of evaporation of cough droplets in inhomogeneous humidity fields using the multi-component Eulerian-Lagrangian approach. *Building and Environment*, 128(November 2017), 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.11.025>
- Li, Y., Leung, G. M., Tang, J. W., Yang, X., Chao, C. Y. H., Lin, J. Z., Lu, J. W., Nielsen, P. V., Niu, J., Qian, H., Sleigh, A. C., Su, H. J. J., Sundell, J., Wong, T. W., & Yuen, P. L. (2007). Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment - A multidisciplinary systematic review. *Indoor Air*, 17(1), 2–18. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2006.00445.x>
- Lim, T., Cho, J., & Kim, B. S. (2010a). The influence of ward ventilation on hospital cross infection by varying the location of supply and exhaust air diffuser using CFD. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 9(1), 259–266. <https://doi.org/10.3130/jaabe.9.259>
- Lim, T., Cho, J., & Kim, B. S. (2010b). The predictions of infection risk of indoor airborne transmission of diseases in high-rise hospitals: Tracer gas simulation. *Energy and Buildings*, 42(8), 1172–1181. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.02.008>

- Liu, J., Liao, X., Qian, S., Yuan, J., Wang, F., Liu, Y., Wang, Z., Wang, F., Liu, L., & Zhang, Z. (2020). Community Transmission of Severe Acute Respiratory. *Emerging Infectious Diseases*, 26(6), 1320–1323.
- Mirzaie, M., Lakzian, E., Khan, A., Warkiani, M. E., Mahian, O., & Ahmadi, G. (2021). COVID-19 spread in a classroom equipped with partition – A CFD approach. *Journal of Hazardous Materials*, 420(June), 126587. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126587>
- Morawska, L. (2006). Droplet fate in indoor environments, or can we prevent the spread of infection? *Indoor Air*, 16(5), 335–347. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2006.00432.x>
- Morawska, L., & Cao, J. (2020). Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality. *Environment International*, 139(April), 105730. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105730>
- Santarpia, J. L., Herrera, V. L., Rivera, D. N., Ratnesar-shumate, S., Reid, P., Denton, P. W., Martens, J. W. S., Fang, Y., Conoan, N., Callahan, V., Lawler, J. V, Brett-major, D. M., & Lowe, J. J. (2020). *The Infectious Nature of Patient-Generated SARS-CoV-2 Aerosol Joshua. Cdc.*
- Sheikhnejad, Y., Aghamolaei, R., Fallahpour, M., Motamedi, H., Moshfeghi, M., Mirzaei, P. A., & Bordbar, H. (2022). Airborne and aerosol pathogen transmission modeling of respiratory events in buildings: An overview of computational fluid dynamics. *Sustainable Cities and Society*, 79(January), 103704. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103704>
- Wang, J. X., Cao, X., & Chen, Y. P. (2021). An air distribution optimization of hospital wards for minimizing cross-infection. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123431. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123431>
- WHO. (2014). Infection prevention and control of epidemic- and pandemic-prone acute respiratory infections in health care. *The International Encyclopedia of Biological Anthropology*, 1–2. <https://doi.org/10.1002/9781118584538.ieba0303>
- Yang, L., Liu, X., Qian, F., & Du, S. (2019). Ventilation effect on different position of classrooms in “line” type teaching building. *Journal of Cleaner Production*, 209, 886–902. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.228>
- Zhu, S., Demokritou, P., & Spengler, J. (2010). Experimental and numerical investigation

of micro-environmental conditions in public transportation buses. *Building and Environment*, 45(10), 2077–2088. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.03.004>