



Pengaruh Desain Inlet Outlet terhadap Distribusi Partikel di Ruang Pencampuran Industri Farmasi : Studi CFD

Devin Adiriwanto Sutiono¹, Arnas Lubis²

Universitas Indonesia, Indonesia

Email: devin.adiriwanto@gmail.com

Abstrak

Di industri farmasi, dispersi partikel yang buruk dapat membahayakan kualitas produk, proses manufaktur. Dispersi partikel yang buruk dapat mengganggu proses berikutnya, seperti filtrasi, pengeringan, dan pemerasan tablet. Dispersi partikel sangat dipengaruhi oleh aliran udara. Penempatan saluran masuk dan keluar dapat menentukan pola aliran udara di ruang bersih. Pemakaian purifier juga dapat mengurangi jumlah partikel di dalam ruangan. Tujuan penelitian ini untuk melakukan simulasi CFD untuk menampilkan distribusi partikel, jumlah partikel yang dapat dibersihkan. Model yang digunakan untuk simulasi adalah single side down, top supply down return. Penambahan purifier mobile di dua lokasi berbeda akan ditinjau penulis untuk mengetahui apakah purifier memberikan dampak signifikan di dalam membersihkan partikel. Supply yang berada di langit langit dapat menyebabkan distribusi partikel yang tidak merata. Sedangkan supply dari sisi samping memberikan turbulensi yang lebih seimbang, sehingga sebaran partikel lebih seragam. Letak purifier yang jauh dari outlet lebih besar dalam mengeluarkan partikel ketimbang letak purifier yang dekat. Dimana untuk model single side down terdapat selisih 61.256.696 partikel. Untuk model top down return terdapat selisih 22.893.261 partikel. Model yang paling banyak mengeluarkan partikel adalah single side dengan purifier jauh yaitu 255.247.925 partikel. Dapat membersihkan sekitar 78,17% dari jumlah partikel di ruangan. Hasil simulasi CFD menunjukkan bahwa desain inlet dan outlet memainkan peran penting dalam menciptakan pola aliran yang optimal dan distribusi partikel yang seragam di dalam ruang pencampuran. Variasi pada jumlah, posisi, dan orientasi inlet serta outlet terbukti mempengaruhi secara signifikan karakteristik aliran dan dispersi partikel.

Kata Kunci : CFD, Distribusi Partikel, Purifier, Inlet, Outlet

Abstract

In the pharmaceutical industry, poor particle dispersion can harm product quality, manufacturing process. Poor particle dispersion can interfere with subsequent processes, such as filtration, drying, and tablet squeezing. The dispersion of particles is greatly affected by the airflow. The placement of the inlet and outlet outlets can determine the airflow pattern in the cleanroom. The use of a purifier can also reduce the number of particles in the room. The purpose of this study is to simulate CFD to display the distribution of particles, the number of particles that can be cleaned. The model used for the simulation is single side down, top supply down return. The addition of mobile purifiers in two different locations will be reviewed by the authors to find out whether purifiers have a significant impact in cleaning particles. The supply in the sky can cause an uneven distribution of particles. Meanwhile, the supply from the side provides a more balanced turbulence, so that the distribution of particles is more uniform. The location of the purifier far from the outlet is greater in removing particles than the location of the purifier is close. Where for the single side down model there is a difference of 61,256,696 particles. For the top down return model, there is a difference of 22,893,261 particles. The model that emits the most particles is a single side with a remote purifier of 255,247,925 particles. It can clean about 78.17% of the total number of particles in the room. The results of the CFD simulation show that the inlet and outlet design plays an important role in creating an optimal flow pattern and uniform particle distribution within the mixing chamber. Variations in the number, position, and orientation of inlets and outlets have been shown to significantly affect the flow characteristics and dispersion of particles.

Keywords CFD, particle distribution, purifier, inlet, outlet

PENDAHULUAN

Industri farmasi sangat memperhatikan kebutuhan ruang bersih untuk memastikan kualitas produk. Validasi di dalam pembersihan adalah prosedur penting yang memastikan bahwa fasilitas dan peralatan tidak terkontaminasi (Dahiya et al. 2022). Pengujian sterilitas pada permukaan alat, seperti enumeration of germinable endospores sangat penting untuk menjaga kebersihan dan infertilitas dalam lingkungan farmasi (Yung, Lester, and Ponce 2020). Pentingnya protokol pembersihan yang ketat untuk mencegah kontaminasi mikroba (Malli Mohan, Stricker, and Venkateswaran 2019); (Mohapatra and La Duc 2012); (Patra et al. 2022). Bakteri di kamar bersih farmasi diidentifikasi menggunakan time of flight mass spectrometry matrix-assisted laser desorption ionization. Ini menunjukkan betapa pentingnya memantau dan menemukan mikroorganisme dengan benar di ruang bersih ini (Andrade et al. 2018). Referensi diatas menekankan betapa pentingnya mematuhi persyaratan ruang bersih yang ketat dalam industri farmasi.

Di industri farmasi, dispersi partikel yang buruk dapat membahayakan kualitas produk, proses manufaktur, dan keselamatan pasien (Handayani and Siregar 2020). Beberapa elemen penting dipengaruhi secara signifikan oleh distribusi partikel yang tidak seragam. Dispersi partikel yang tidak cukup dapat menyebabkan ketidaksesuaian dalam komposisi obat, yang berdampak pada kesamaan dan efektivitas produk farmasi. Kecepatan di mana obat-obatan melarutkan, ketersediaan biologis mereka, dan kinerja keseluruhan produk dapat dipengaruhi oleh variasi dalam ukuran partikel dan distribusi (Pohlman et al. 2023). Dispersi partikel yang tidak memadai dapat mengganggu proses berikutnya, seperti filtrasi, pengeringan, dan pemerasan tablet. Hal ini dapat mengganggu proses manufaktur dan menyebabkan ketidakmampuan atau kegagalan produk karena ukuran dan distribusi partikel yang tidak teratur (Fen Liu et al. 2022); (Fan Liu et al. 2022). Partikel yang tidak diatur dapat meningkatkan kemungkinan kontaminasi di ruangan yang bersih yang digunakan untuk tujuan medis. Partikel-partikel ini dapat mengangkut mikroorganisme berbahaya ke lingkungan, membahayakan kebersihan lingkungan, dan berpotensi mengkontaminasi produk (Sifri, Burke, and Enfield 2016). Ukuran dan dispersi partikel adalah komponen penting dalam sistem pengiriman obat. Fungsi sistem pengiriman obat dapat terganggu oleh dispersi partikel yang tidak memadai, yang berdampak pada kinetika pelepasan obat, tingkat penyerapan (Kumar, Dalvi, and Siril 2020). Dalam formulasi farmasi, ukuran dan distribusi partikel dapat memengaruhi stabilitas produk. Formulasi yang tidak stabil dapat disebabkan oleh dispersi partikel yang tidak memadai, yang dapat menyebabkan masalah seperti gabungan kristal, pembentukan struktur kristal yang berbeda, dan penurunan stabilitas produk (Ngilirabanga and Samsodien 2021).

Banyak faktor memengaruhi dispersi partikel di ruang bersih di industri farmasi. Ukuran partikel sangat penting, karena penelitian telah menunjukkan bahwa partikel biasanya berukuran antara 0,31 hingga 4,5 μm , dan rentang ukuran ini mempengaruhi distribusi partikel di ruangan berventilasi (Zhang and Chen 2006); (Chen et al. 2022). Tingkat konsentrasi partikel sangat dipengaruhi oleh kecepatan aliran udara di dalam ruangan bersih. Perubahan kecepatan aliran udara memengaruhi tingkat konsentrasi partikel (Mičko et al. 2022); (Lin et al. 2020). Kecepatan ventilasi aspek yang mempengaruhi thermal plume control dan dispersi partikel, terutama di tempat-tempat seperti ruang isolasi (Yang, Yang, and Zhao 2015). Selain itu, arah aliran udara, apakah vertikal atau horizontal, dapat memengaruhi bagaimana partikel yang membawa bakteri tersebar di teater. Ini menunjukkan bagaimana arah aliran udara sangat penting untuk membatasi penyebaran partikel (Romano et al. 2015).

Lokasi saluran masuk dan keluar di ruangan yang bersih dapat memiliki pengaruh signifikan terhadap distribusi partikel di dalam ruang. Penempatan saluran masuk dan keluar dapat menentukan pola aliran udara di ruang bersih (Kraus and Senitkova 2019). Pola aliran udara ini memainkan peran

penting dalam mengendalikan gerakan dan distribusi partikel (Lu and Lin 2022). Saluran yang dirancang dan diposisikan dengan benar dapat memastikan bahwa udara bersih yang disaring dikirim secara efisien ke seluruh ruang bersih, menciptakan aliran udara seragam yang membantu mencegah akumulasi dan penyebaran partikel. Partikel yang tertinggal di dalam ruangan dapat menyebabkan kontaminasi pada produk lain. Oleh sebab itu diperlukan pola aliran udara yang baik agar partikel terdistribusi keluar melalui outlet.

Air Purifier dapat memainkan peran penting dalam menjaga kualitas udara yang diinginkan di ruangan bersih. Perangkat ini dirancang untuk menyaring dan menghilangkan berbagai partikel di udara, seperti debu, alergen, dan mikroorganisme. Air purifier sangat penting untuk mempertahankan kualitas udara dan mengurangi polusi partikel di ruang bersih industri farmasi. Sistem ionisasi udara listrik dan stand-alone hepa filter sering digunakan untuk meningkatkan purifikasi udara dan meminimalkan partikel di udara (Scheuch 2020). Stand alone hepa filter ini adalah pembersih udara portabel yang dapat mengurangi konsentrasi aerosol di ruangan, meningkatkan kualitas udara (Kohanski, Lo, and Waring 2020). Mobile air purifier terbukti efektif mengurangi jumlah partikel infeksi di area tertutup, menciptakan lingkungan yang lebih bersih dan aman (Curtius, Granzin, and Schrod 2021); (Lindsley 2021). Kombinasi penggunaan pembersih udara HEPA bersama sistem ventilasi mengurangi jumlah partikel infeksi di udara (Lindsley 2021). Penelitian lain menunjukkan bahwa sistem air purifier secara efektif mengurangi keberadaan partikel di udara, terutama di lingkungan dengan individu yang sakit, sehingga meningkatkan kualitas udara dan meminimalkan risiko kontaminasi (Burgmann and Janoske 2021). Untuk membuat dan mempertahankan lingkungan bedah steril, penggabungan teknologi pembersihan udara seperti ventilasi, distribusi udara satu arah, manajemen tekanan, dan filtrasi udara diperlukan di ruang operasi (Zhou et al. 2018). Sistem pembersihan udara aktif seperti air purifier telah menunjukkan hasil yang baik dalam mengurangi insiden infeksi di ruang tertutup, yang menunjukkan betapa pentingnya alat ini dalam lingkungan ruang bersih farmasi (Wang et al. 2023); (Bivolarova et al. 2017).

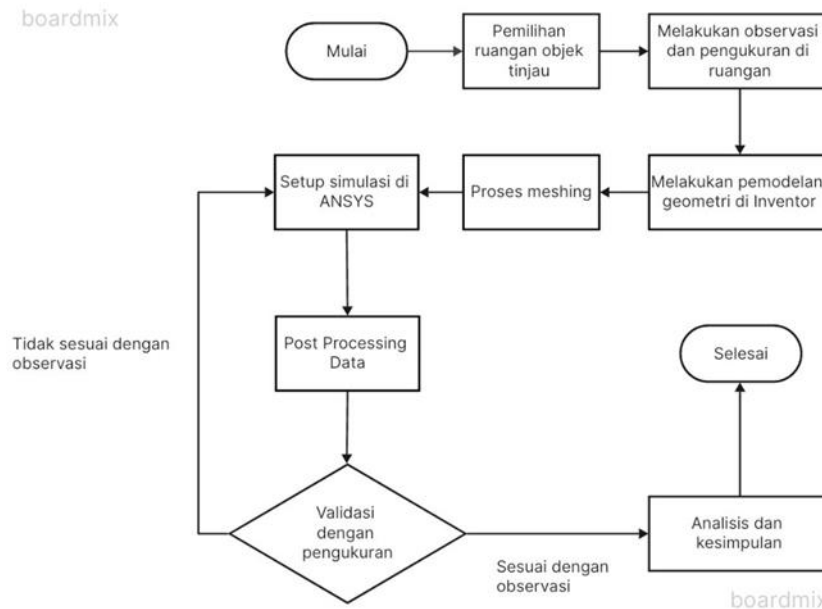
Sebab itu penulis membuat simulasi CFD untuk mengetahui distribusi partikel, partikel yang dapat dibersihkan dari 2 model yaitu single side down return dan top down return (Arpino et al. 2023). Penambahan purifier dengan lokasi yang berbeda untuk mengetahui apakah purifier memiliki efek yang signifikan dalam mengurangi partikel di ruang mixing. Simulasi CFD memungkinkan peneliti untuk memprediksi dan memvisualisasikan pola aliran, distribusi, dan karakteristik partikel dalam proses manufaktur farmasi secara virtual, melalui simulasi CFD, peneliti dapat menganalisis secara mendalam bagaimana desain peralatan, parameter proses, dan properti material mempengaruhi dispersi partikel (Thongsri 2017). Pemahaman yang diperoleh dari simulasi CFD dapat membantu mengembangkan strategi penanganan dispersi partikel yang lebih efektif, seperti modifikasi desain peralatan atau penyesuaian kondisi operasi (Chang, Lin, and Hsu 2023).

Penelitian ini bertujuan untuk membuat simulasi model ruang pencampuran padatan menggunakan aplikasi CFD. Mengetahui pengaruh letak inlet dan outlet terhadap distribusi partikel dengan penambahan purifier model . Mengetahui apakah purifier efektif mengurangi partikel selama proses berlangsung. Mengetahui pengaruh lokasi purifier terhadap pembersihan partikel. Mengetahui model yang terbaik dalam mengurangi partikel. Penelitian ini memberikan wawasan baru tentang dampak dispersi partikel yang buruk dalam proses manufaktur farmasi. Pemahaman yang lebih baik tentang fenomena ini dapat membantu industry farmasi mengembangkan strategi untuk meningkatkan kualitas produk dan efisiensi proses. Hasil penelitian ini dapat dimanfaatkan untuk mengembangkan teknik atau teknologi baru dalam penanganan dispersi partikel, misalnya melalui modifikasi desain peralatan, penyesuaian parameter proses, atau pengembangan bahan baku yang lebih mudah terdispersi. Temuan penelitian ini dapat berkontribusi pada peningkatan keandalan dan konsistensi proses produksi

farmasi, serta mengurangi risiko kontaminasi dan kegagalan produk.

METODE PENELITIAN

Diagram Alir Penelitian

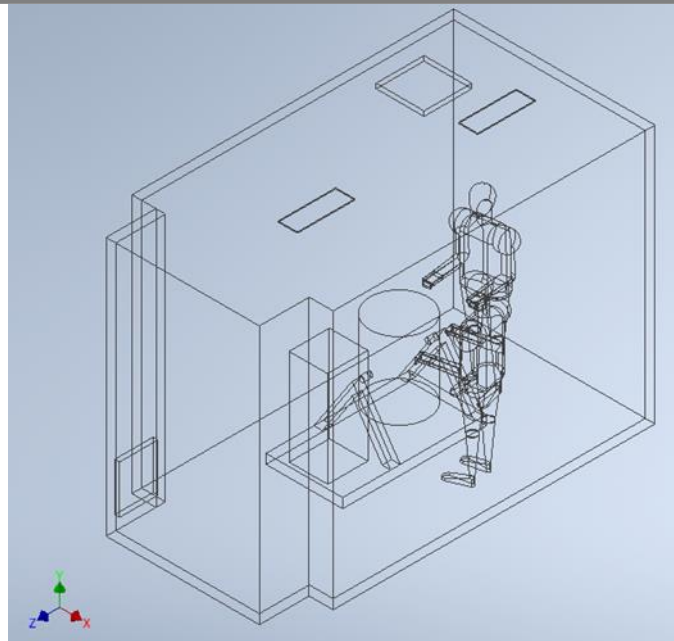


Gambar 1. Diagram alir penelitian

Boundary Condition

Gambar CAD 3 dimensi kondisi aktual ruang final mixing dapat dilihat pada gambar 3.4. Ruang Final Mixing terdiri dari 1 inlet suplai, 1 outlet return, 2 Lampu, 1 mesin mixing. Saat proses mixing biasanya dilakukan 1 atau 2 orang. Dengan spesifikasi sebagai berikut:

1. Ukuran ducting inlet : 50 cm x 50 cm
2. Ukuran ducting outlet : 40 cm x 50 cm
3. Ukuran ruangan : 368 cm x 190 cm x 250 cm
4. Ukuran lampu : 60 cm x 30 cm
5. Ukuran orang : 170 cm x 60 cm x 20 cm



Gambar 2. Gambar CAD 3 dimensi kondisi aktual ruangan final mixing

Di dalam Simulasi ANSYS, kita diwajibkan menentukan suhu wall / dinding. Suhu dinding ditentukan berdasarkan suhu ruangan yang berada disebelah ruang final mixing. Batasan suhu dinding dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1 Batasan suhu dinding ruang final mixing

Sisi searah sumbu	Berbatasan dengan	Suhu (C)
x	koridor	21
(-x)	ruang staging	21
y	lingkungan luar	33
(-y)	ruang produksi liquid	21
z	ruang wet granulation	21
(-z)	koridor	21

Hasil Pengukuran terhadap parameter yang berada di ruang final mixing dapat dilihat di tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengukuran

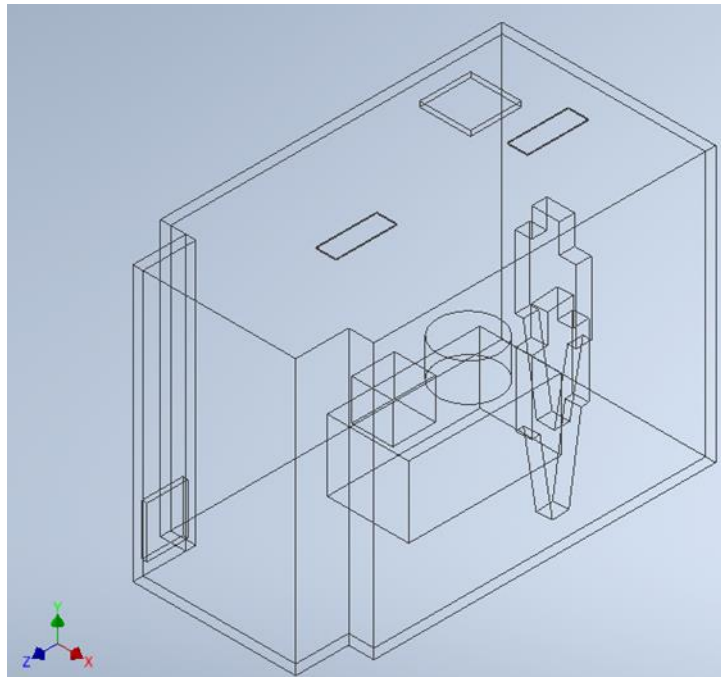
Parameter	Satuan	Value
Flow inlet	CFM	300
Mass inlet	Kg/s	0,1715
Suhu orang	C	36
Suhu Lampu	C	35
Suhu Mesin	C	30

Suhu ruang	C	21
------------	---	----

Differential Pressure	Pa	11
-----------------------	----	----

Sumber: Data diolah

Bentuk Geometri yang terlalu kompleks dapat menyebabkan error pada saat meshing, oleh sebab itu penulis menyederhanakan dengan bentuk yang lebih sederhana. Geometri yang lebih sederhana dapat dilihat gambar 3.



Gambar 3 Gambar CAD 3 dimensi kondisi sederhana ruangan final mixing

Validasi

Untuk memvalidasi keadaan dari simulasi ANSYS, hasil simulasi yang didapat selanjutnya divalidasi dengan data actual yang diukur di ruang final mixing. Tujuannya untuk memastikan energi pada ruangan model bisa merepresentasikan dan mendekati sistem actual dalam beberapa kondisi. Berikut adalah alat ukur yang digunakan dalam penelitian ini (Fluent 2009).

Tabel 3. Alat ukur beserta parameter dan satuan

Nama Alat Ukur	Parameter	Satuan
<i>Alnor Balometer Capture Hood EBT731</i>	<i>Flow rate</i>	CFM
<i>Particle Counter Solair 3100</i>	<i>Particle Concentration</i>	PPM
<i>Velocicalc Multi Function Ventilation Meter 9565</i>	Kecepatan Udara	m/s
	<i>Differential Pressure</i>	Pa
<i>Hygrometer</i>	Suhu	C
	Kelembapan	%

Untuk gambar alat ukur dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 4. Velocalc Multi Function Ventilation Meter 9565



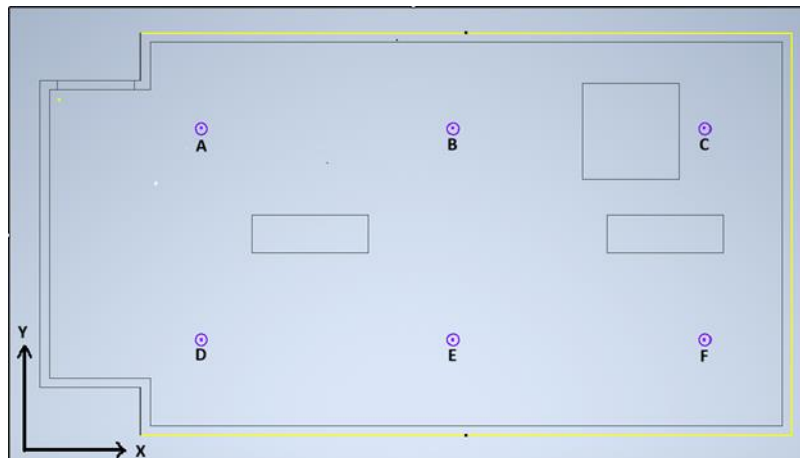
Gambar 5. Particle Counter Solair 3100



Gambar 6. Alnor Balometer Capture Hood EBT731

Penulis menggunakan 6 titik yang menjadi titik pengukuran, untuk tampilan titik lokasi dari

tampak atas dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 7. Lokasi Titik Pengukuran Dari Tampak Atas

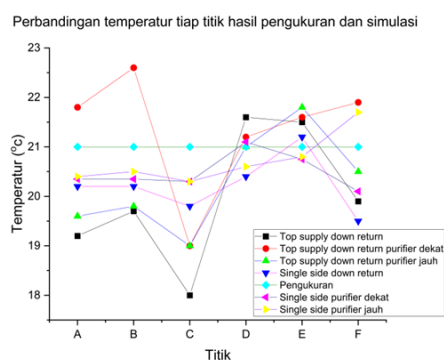
Untuk detail koordinat tempat pengukuran dapat dilihat pada tabel 4

Tabel 4. Koodinat titik pengukuran

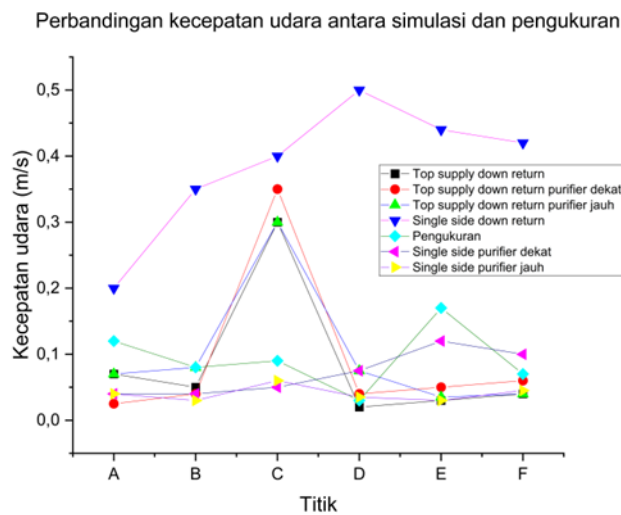
Titik	X(m)	Y(m)	Tinggi(m)
A	0,832	1,6	1
B	2,132	1,6	1
C	3,432	1,6	1
D	0,832	0,5	1
E	2,132	0,5	1
F	3,432	0,5	1

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Validasi



Gambar 8. Grafik Perbandingan Temperatur Tiap Titik Antara Simulasi Dan Pengukuran



Gambar 9. Grafik Perbandingan Kecepatan Udara Tiap Titik Antara Simulasi Dan Pengukuran

Hasil pengukuran pada grafik menunjukkan bahwa temperatur di tiap 6 titik adalah sama. Tipe lain memiliki bentuk grafik tidak konstan namun memiliki pola yang relative mirip. Dari table 2 diatas dapat dilihat bahwa top supply down return ,top supply down return dengan purifier dekat dan jauh, memiliki bentuk chart yang relative mirip. Single side purifier memiliki kemiripan dengan hasil pengukuran. Dan single side down return memiliki perbedaan yang beda sendiri. Titik C pada model Top supply memiliki kecepatan udara yang hampir sama disebabkan titik C berada di bawah aliran suplai inlet.

Setelah dilakukan pengukuran oleh partikel counter ditemukan bahwa saat produksi berlangsung terdapat partikel $\alpha = 0,5$ sebesar 17.940.413 PPM. Pada saat produksi hanya dapat dilakukan satu kali pengukuran di satu titik disebabkan jumlah partikel yang berlebih menyebabkan blocking eror pada particle counter. Apabila dilanjutkan dapat menyebabkan rusaknya alat uji. Sehingga jumlah partikel diasumsikan sebagai berikut:

$$PPM = \frac{\text{Jumlah Partikel di ruangan}}{\text{volume ruangan (m}^3\text{)}}$$

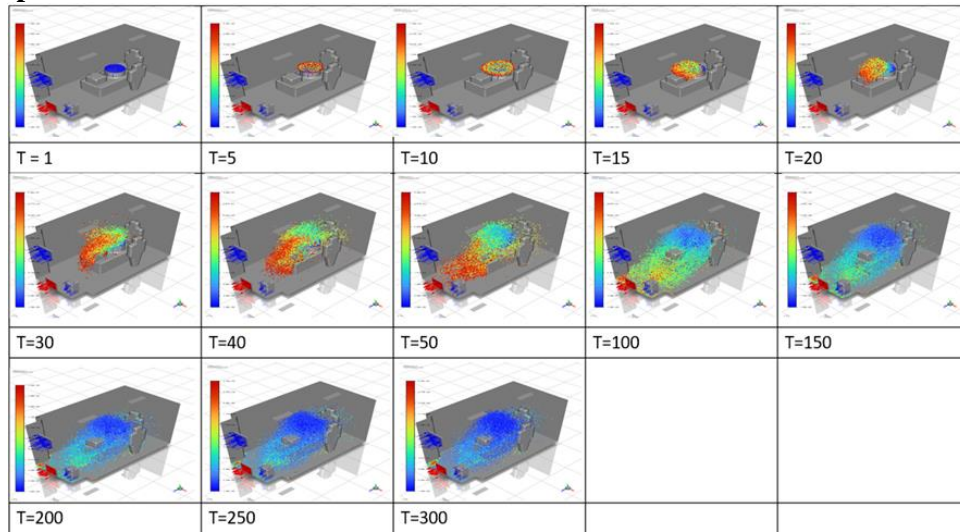
$$\text{Jumlah partikel di ruangan} = PPM \times \text{Volume ruangan}$$

$$\text{Jumlah partikel di ruangan} = 17.940.413 \times 18,2$$

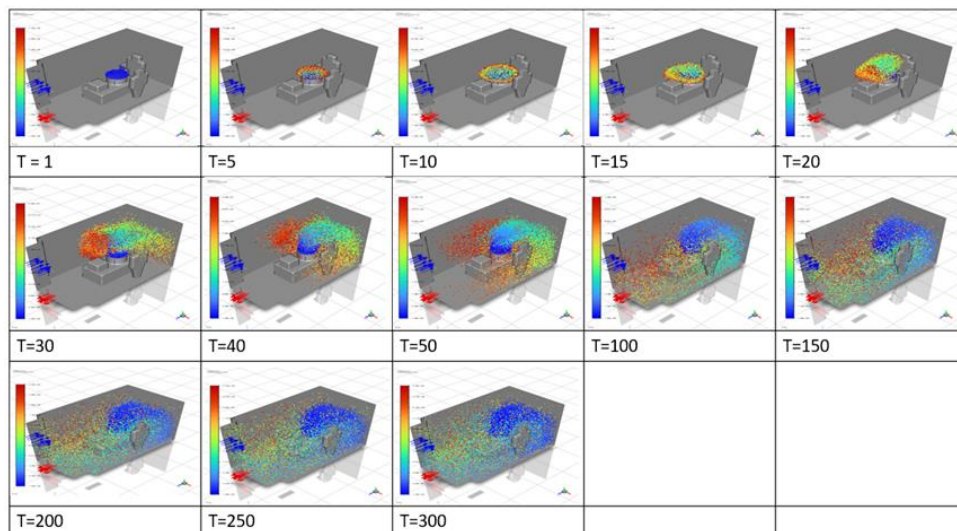
$$\text{Jumlah partikel di ruangan} = 326.515.516$$

Waktu yang digunakan sebagai asumsi adalah 300 detik karena proses mixing kurang lebih berlangsung selama 5 menit. Dengan mass flow yang diinjeksi ke ruangan adalah $4,22 \times 10^{-5}$ kg per satu detiknya. Sehingga total mass yang dihasilkan selama 300 detik adalah 0,01266 kg. Massa Jenis yang digunakan adalah $593 \frac{kg}{m^3}$. Dengan bentuk partikel yang berbentuk bola dengan jari jari $2,5 \mu$, maka volume partikel adalah sebesar $6,55 \cdot 10^{-14} m^3$. Maka massa partikel adalah sebesar $3,88 \cdot 10^{-14}$ kg untuk 1 partikel. Sehingga jumlah partikel ruangan didalam simulasi ANSYS adalah 326.288.659.

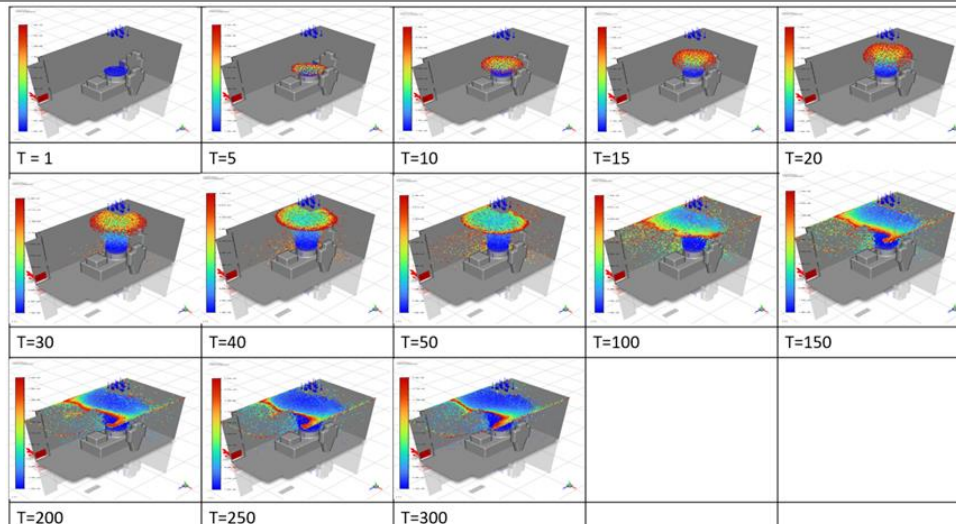
Distribusi partikel



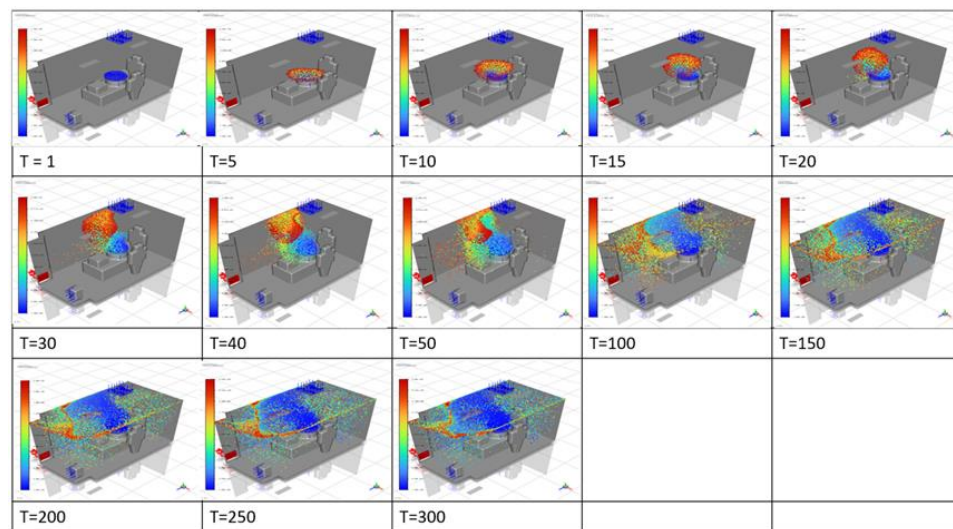
Gambar 10. Gambar Sebaran Partikel Model *Single Side* Dengan *Purifier* Dekat Pada Saat $T = 1$ Hingga $T = 300$



Gambar 11. Gambar Sebaran Partikel Model *Single Side* Dengan *Purifier* Jauh Pada Saat $T = 1$ Hingga $T = 300$



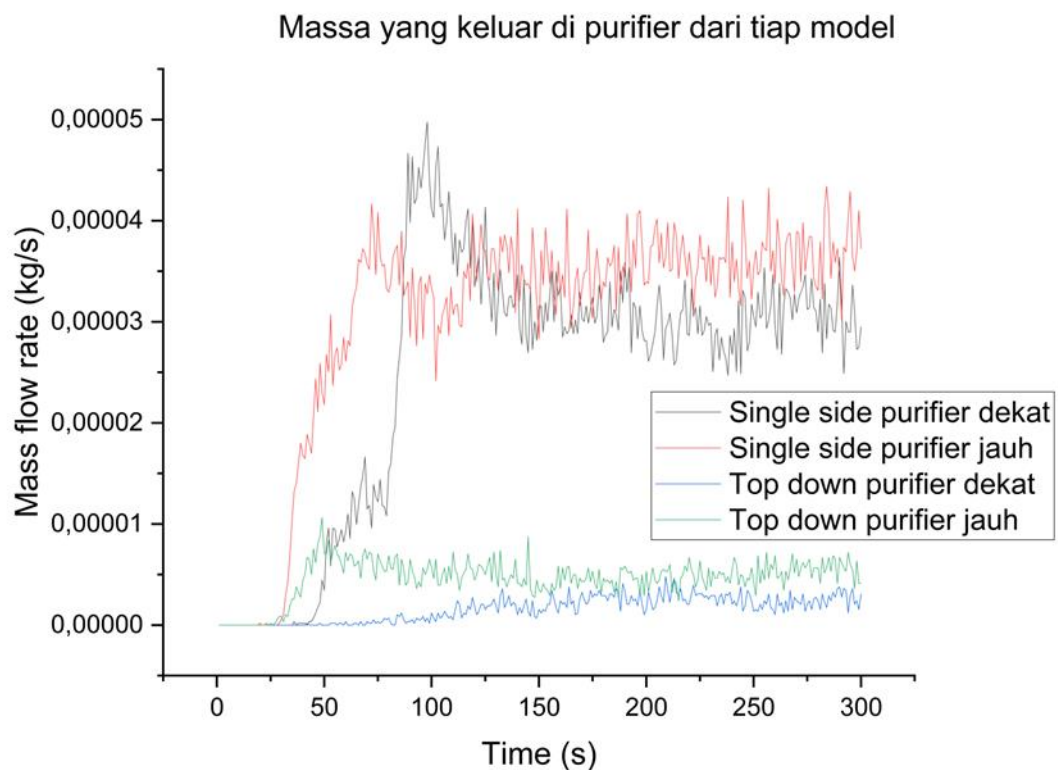
Gambar 12. Gambar Sebaran Partikel Model *Top Down Purifier Jauh* pada Saat $T = 1$ Hingga $T = 300$



Gambar 13. Gambar sebaran partikel model top down purifier dekat pada saat $T = 1$ hingga $T = 300$

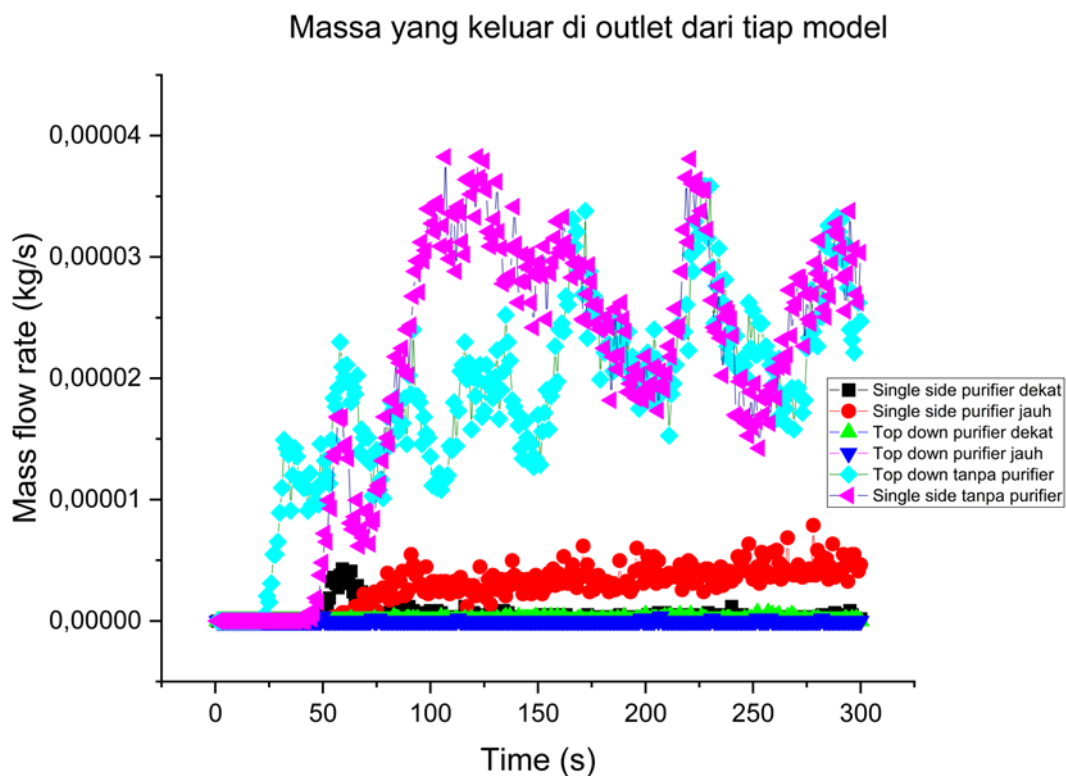
Pada gambar 3.3 Aliran tampaknya masuk dari kiri, melambat secara signifikan di tengah, dan bersirkulasi oleh karena purifier berada di dekat outlet. Tidak terjadi turbulen yang begitu besar dapat terlihat dari jejak yang tersebar pada $T = 100$ hingga $T = 300$. Pada gambar 3.4 dari jejak partikel menunjukkan aliran dari kiri ke kanan, dengan beberapa resirkulasi dan turbulensi disebabkan adanya purifier yang diposisi yang jauh dari outlet, dapat terlihat dari jejak yang tersebar pada $T = 100$ hingga $T = 300$. Pada gambar 3.5 dan 3.6 terlihat partikel banyak terkonsentrasi di bagian Tengah dan atas dan ruangan yang disebabkan adanya turbulensi akibat adanya purifier, dapat dilihat pada $T=100$ hingga $T=300$.

Perbandingan massa partikel yang keluar



Gambar 14. Grafik Massa Yang Keluar Melewati Purifier Tiap Model

Untuk model top down memiliki tingkat turbulensi yang lebih besar ketimbang single side down. Apalagi dengan ditambahkan purifier menyebabkan aliran udara lebih acak dari sebelumnya. Dapat terlihat dari gambar 7 bahwa single side dengan purifier dekat dan jauh lebih banyak membersihkan partikel ketimbang top down dengan top down purifier dekat dan jauh. Untuk gambar 3.8 terlihat bahwa single side tanpa purifier terlihat lebih banyak membersihkan partikel daripada top down tanpa purifier dan model lainnya.



Gambar 15. Grafik massa yang keluar melewati outlet dari tiap model

Tabel 5. Perbandingan partikel yang terbang tiap model

Tipe	Total partikel yang keluar
Single side purifier dekat	193.991.429
Single side purifier jauh	255.247.925
Top down purifier dekat	12.830.483
Top down purifier jauh	35.723.744
Single side	160.297.041
Top down	142.585.491

Total partikel yang dapat dibersihkan tiap model terbesar adalah model single side purifier jauh yaitu 255.247.925 atau sekitar 78,17%. Dari model ini terlihat bahwa single side dengan purifier jauh dapat mengalahkan model single side tanpa purifier.

KESIMPULAN

Dari hasil dan pembahasan diatas dapat disimpulkan yaitu lokasi saluran inlet masuk secara signifikan mempengaruhi pola aliran udara dan turbulensi di dalam ruang mixing. Dimana untuk supply yang berada di Langit langit dapat menyebabkan distribusi partikel yang tidak merata. Sedangkan supply dari sisi samping memberikan turbulensi yang lebih seimbang, sehingga sebaran partikel lebih seragam. Letak purifier yang jauh dari outlet lebih besar dalam mengeluarkan partikel ketimbang letak purifier yang dekat. Dimana untuk model single side down terdapat selisih 61.256.696 partikel. Untuk model top down return terdapat selisih 22.893.261 partikel. Model yang paling banyak mengeluarkan partikel adalah single side dengan purifier jauh yaitu 255.247.925 partikel. Dapat membersihkan sekitar 78,17% dari jumlah partikel di ruangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Andrade, Laise De Oliveira, Rajendra Awasthi, Kamal Dua, and Terezinha de Jesus Andreoli Pinto. 2018. "Matrix-Assisted Laser Desorption Ionization–Time of Flight Mass Spectrometry for Identification of Bacteria Isolated from Pharmaceutical Clean Rooms." *Interventional Medicine and Applied Science* 10(1):45–53.
- Arpino, Fausto, Gino Cortellessa, Andrea Carlo D’Alicandro, Giorgio Grossi, Nicola Massarotti, and Alessandro Mauro. 2023. "CFD Analysis of the Air Supply Rate Influence on the Aerosol Dispersion in a University Lecture Room." *Building and Environment* 235:110257.
- Bivolarova, M., Jakub Ondráček, A. Melikov, and Vladimír Ždímal. 2017. "A Comparison between Tracer Gas and Aerosol Particles Distribution Indoors: The Impact of Ventilation Rate, Interaction of Airflows, and Presence of Objects." *Indoor Air* 27(6):1201–12.
- Burgmann, Sebastian, and Uwe Janoske. 2021. "Transmission and Reduction of Aerosols in Classrooms Using Air Purifier Systems." *Physics of Fluids* 33(3).
- Chang, Tong-Bou, Yu-Sheng Lin, and Yi-Tian Hsu. 2023. "CFD Simulations of Effects of Recirculation Mode and Fresh Air Mode on Vehicle Cabin Indoor Air Quality." *Atmospheric Environment* 293:119473.
- Chen, Long, Enyan Wang, Yang Li, Miaocheng Weng, and Fang Liu. 2022. "Study on Self-Cleaning Time and Suspended Particle Distribution in Medical Clean Room." P. 12042 in *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2148. IOP Publishing.
- Curtius, Joachim, Manuel Granzin, and Jann Schrod. 2021. "Testing Mobile Air Purifiers in a School Classroom: Reducing the Airborne Transmission Risk for SARS-CoV-2." *Aerosol Science and Technology* 55(5):586–99.
- Dahiya, Saurabh, Diwan Chand, Yachika Goyal, and Chanchal Sharma. 2022. "Cleaning Validation: A Crucial Step in Assuring Quality During Pharmaceutical Manufacturing." *International Journal of Pharmaceutical Quality Assurance* 13(4):484–89.
- Fluent, ANSYS. 2009. "ANSYS Fluent 12.0 User’s Guide." *Ansys Inc* 15317:1–2498.
- Handayani, Khilda, and Bismar Parlindungan Siregar. 2020. "Tinjauan Terhadap Pertanggungjawaban Seorang Terdakwa Pengekar Sediaan Farmasi (Studi Putusan Mahkamah Agung No. 39 K/Pid. Sus/2010)." *Jurnal Ilmiah METADATA* 2(1):22–43.
- Kohanski, Michael A., L. James Lo, and Michael S. Waring. 2020. "Review of Indoor Aerosol Generation, Transport, and Control in the Context of COVID-19." Pp. 1173–79 in *International forum of allergy & rhinology*. Vol. 10. Wiley Online Library.
- Kraus, Michal, and Ingrid Juhasova Senitkova. 2019. "Material VOC Emissions and Indoor

- Air Quality Simulation.” P. 52082 in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 603. IOP Publishing.
- Kumar, Raj, Sameer V Dalvi, and Prem Felix Siril. 2020. “Nanoparticle-Based Drugs and Formulations: Current Status and Emerging Applications.” *ACS Applied Nano Materials* 3(6):4944–61.
- Lin, Tee, Omid Ali Zargar, Kuan-Yu Lin, Oscar Juiña, Dexter Lyndon Sabusap, Shih-Cheng Hu, and Graham Leggett. 2020. “An Experimental Study of the Flow Characteristics and Velocity Fields in an Operating Room with Laminar Airflow Ventilation.” *Journal of Building Engineering* 29:101184.
- Lindsley, William G. 2021. “Efficacy of Portable Air Cleaners and Masking for Reducing Indoor Exposure to Simulated Exhaled SARS-CoV-2 Aerosols—United States, 2021.” *MMWR. Morbidity and Mortality Weekly Report* 70.
- Liu, Fan, Sujay D. Bagi, Qinglin Su, Rajshree Chakrabarti, Rita Barral, Janaka C. Gamekkanda, Chuntian Hu, and Salvatore Mascia. 2022. “Targeting Particle Size Specification in Pharmaceutical Crystallization: A Review on Recent Process Design and Development Strategies and Particle Size Measurements.” *Organic Process Research & Development* 26(12):3190–3203.
- Liu, Fen, Wei Luo, Junjie Qiu, Yaohao Guo, Shuangliang Zhao, and Bo Bao. 2022. “Continuous Antisolvent Crystallization of Dolutegravir Sodium Using Microfluidics.” *Industrial & Engineering Chemistry Research* 61(19):6693–6702.
- Lu, Yalin, and Zhang Lin. 2022. “Coughed Droplet Dispersion Pattern in Hospital Ward under Stratum Ventilation.” *Building and Environment* 208:108602.
- Malli Mohan, Ganesh Babu, Moogega Cooper Stricker, and Kasthuri Venkateswaran. 2019. “Microscopic Characterization of Biological and Inert Particles Associated with Spacecraft Assembly Cleanroom.” *Scientific Reports* 9(1):14251.
- Mičko, Pavol, Dávid Hečko, Andrej Kapjor, Radovan Nosek, Zuzana Kolková, Peter Hrabovský, and Nikola Čajová Kantová. 2022. “Impact of the Speed of Airflow in a Cleanroom on the Degree of Air Pollution.” *Applied Sciences* 12(5):2466.
- Mohapatra, Bidyut R., and Myron T. La Duc. 2012. “Evaluation of Fluorescence in Situ Hybridization to Detect Encapsulated *Bacillus Pumilus* SAFR-032 Spores Released from Poly (Methylmethacrylate).” *Microbiology and Immunology* 56(1):40–47.
- Ngilirabanga, Jean Baptiste, and Halima Samsodien. 2021. “Pharmaceutical Co-crystal: An Alternative Strategy for Enhanced Physicochemical Properties and Drug Synergy.” *Nano Select* 2(3):512–26.
- Patra, Abinash, Haragouri Mishra, Snigdharani Behera, Gopal Krishna Padhy, Kamini Sethy, Sukanta Satapathy, and Ladi Alik Kumar. 2022. “A Brief Review On Cleaning Validation-Regulatory Guidelines For Pharmaceuticals.” *Journal of Pharmaceutical Negative Results* 4795–99.
- Pohlman, Daniel A., Moussa Boukerche, Jie Chen, Humayun Shariff, and Nandkishor K. Nere. 2023. “Experimental and Computational Evaluation of Sonofragmentation: Toward Enhanced Understanding of Sonocrystallization for Pharmaceuticals.” *Industrial & Engineering Chemistry Research* 62(45):18931–39.
- Romano, Francesco, Luca Marocco, Jan Gustén, and Cesare M. Joppolo. 2015. “Numerical and Experimental Analysis of Airborne Particles Control in an Operating Theater.” *Building and Environment* 89:369–79.
- Scheuch, Gerhard. 2020. “Breathing Is Enough: For the Spread of Influenza Virus and SARS-CoV-2 by Breathing Only.” *Journal of Aerosol Medicine and Pulmonary Drug Delivery* 33(4):230–34.
- Sifri, Costi D., Gene H. Burke, and Kyle B. Enfield. 2016. “Reduced Health Care-Associated

- Infections in an Acute Care Community Hospital Using a Combination of Self-Disinfecting Copper-Impregnated Composite Hard Surfaces and Linens.” *American Journal of Infection Control* 44(12):1565–71.
- Thongsri, Jatuporn. 2017. “A Problem of Particulate Contamination in an Automated Assembly Machine Successfully Solved by CFD and Simple Experiments.” *Mathematical Problems in Engineering* 2017(1):6859852.
- Wang, Chenhua, Chengjun Li, Chuck W. Yu, and Hanqing Wang. 2023. “Mitigation of Airborne Transmission of COVID Virus between Occupants in a Confined Room with an Air Purifier.” *Indoor and Built Environment* 32(10):2034–49.
- Yang, Caiqing, Xudong Yang, and Bin Zhao. 2015. “The Ventilation Needed to Control Thermal Plume and Particle Dispersion from Manikins in a Unidirectional Ventilated Protective Isolation Room.” Pp. 551–65 in *Building Simulation*. Vol. 8. Springer.
- Yung, Pun To, Elizabeth Lester, and Adrian Ponce. 2020. “Quantitative and Fast Sterility Assurance Testing of Surfaces by Enumeration of Germinable Endospores.” *Scientific Reports* 10(1):431.
- Zhang, Z., and Qingyan Chen. 2006. “Experimental Measurements and Numerical Simulations of Particle Transport and Distribution in Ventilated Rooms.” *Atmospheric Environment* 40(18):3396–3408.
- Zhou, Bin, Lili Ding, Fei Li, Ke Xue, Peter V Nielsen, and Yang Xu. 2018. “Influence of Opening and Closing Process of Sliding Door on Interface Airflow Characteristic in Operating Room.” *Building and Environment* 144:459–73.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)