

Studi Numerik Dispersi Debu untuk Mengidentifikasi Potensi *Dust Explosion* di Warehouse Biomassa

Aulia Yasfa Azzahra¹, Agung Nugroho², dan Burniadi Moballa³

^{1,2}Program Studi Teknik Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya 60111

³Program Studi Teknik Permesinan Kapal, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya 60111

*E-mail: ayasfa@student.ppns.ac.id

Abstrak

Abstrak— Biomassa merupakan sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan dan dapat menggantikan penggunaan sumber energi berbahan bakar fosil. Salah satu biomassa yang saat ini telah banyak digunakan adalah sekam padi sebagai bahan bakar boiler biomassa. Namun, penggunaan sekam padi sebagai bahan bakar juga menimbulkan sejumlah tantangan seperti risiko *dust explosion* yang dapat terjadi karena adanya debu sekam padi yang tersuspensi di udara dan mendapatkan sumber penyalaaan (*ignition source*). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyimulasikan dispersi konsentrasi debu yang tersuspensi di warehouse biomassa sehingga dapat diketahui area mana saja yang berisiko terjadi *dust explosion* agar bisa dilakukan tindakan preventif. Studi numerik *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak OpenFOAM untuk memodelkan persebaran konsentrasi debu di dalam warehouse dengan mempertimbangkan berbagai parameter penting seperti kecepatan aliran udara, distribusi ukuran partikel debu, dan sumber emisi debu yang berasal dari *moving floor*. Hasil penelitian menunjukkan adanya area dengan konsentrasi debu yang tinggi, terutama di area sekitar sisi kanan *moving floor* dengan konsentrasi debu sekitar 56-198 g/m³ yang telah memenuhi *Minimum Explosive Concentration* (MEC) sehingga menimbulkan risiko terjadinya *dust explosion*.

Kata Kunci: Ledakan Debu, Computational Fluid Dynamics, Konsentrasi Debu, Biomassa

Abstract

Abstract— Biomass is a renewable energy source that is environmentally friendly and can replace the use of fossil fuel energy sources. One of the biomasses that is currently widely used is rice husks as biomass boiler fuel. However, the use of rice husks as fuel also poses a number of challenges such as the risk of dust explosions which can occur due to the presence of rice husk dust suspended in the air and finding an ignition source. The aim of this research is to simulate the dispersion of dust concentrations suspended in warehouse biomass so that it can be known which areas are at risk of dust explosions so that preventive measures can be taken. Computational Fluid Dynamics (CFD) numerical studies were carried out using OpenFOAM software to model the distribution of dust concentration in the warehouse by considering various important parameters such as air flow velocity, dust particle size distribution, and dust emission sources originating from moving floors. The research results show that there are areas with high dust concentrations, especially in the area around the right side of the moving floor with a dust concentration of around 56-198 g/m³ which meets the Minimum Explosive Concentration (MEC), thereby creating a risk of dust explosions.

Keywords: Dust Explosion, Computational Fluid Dynamics, Dust Concentration, Biomass

1. PENDAHULUAN

Biomassa merupakan sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan dan dapat menggantikan penggunaan sumber energi berbahan bakar fosil. Salah satu biomassa yang saat ini telah banyak digunakan adalah sekam padi sebagai bahan bakar boiler biomassa. Sekam padi merupakan limbah pertanian yang sering dimanfaatkan sebagai biomassa untuk bahan bakar alternatif atau bahan baku industri. Namun, sekam padi memiliki karakteristik tertentu yang menjadikannya rentan terhadap ledakan debu. Partikel-partikel sekam padi yang halus mudah terdispersi di udara, dan ketika mencapai konsentrasi tertentu dalam ruangan tertutup, dapat memicu ledakan debu jika terkena

sumber api atau percikan listrik (Carson & Mumford, 2018).

Dust Explosion (Ledakan Debu) adalah reaksi pembakaran cepat yang terjadi ketika partikel debu yang tersuspensi di udara terbakar dengan sangat cepat, menghasilkan gelombang tekanan yang kuat (Eckhoff, 2003). *Dust explosion* hanya dapat terjadi jika seluruh elemen dalam dust explosion pentagon terpenuhi. Elemen tersebut adalah bahan bakar yang berupa: *combustible dust*, oksigen di udara, sumber ignisi, suspensi partikulat debu di udara pada jumlah dan konsentrasi tertentu, dan ruang terbatas seperti: mesin dan gedung yang dapat meningkatkan tekanan untuk memicu ledakan (CSB, 2006). *Dust Explosion* merupakan salah satu ancaman serius yang dapat terjadi di berbagai industri, terutama di tempat penyimpanan biomassa seperti warehouse sekam padi. Pengendalian debu, pemantauan konsentrasi debu di udara, serta penerapan standar keamanan yang ketat menjadi sangat penting untuk mencegah terjadinya ledakan (Eckhoff, 2009). Ledakan debu dapat terjadi sehingga dapat menimbulkan ancaman besar terhadap keselamatan pekerja dan kerugian pada perusahaan (Huéscar Medina et al., 2015). Selain kerusakan struktural pada bangunan, ledakan ini juga dapat menyebabkan cedera serius atau bahkan kematian bagi pekerja yang berada di lokasi kejadian. Oleh karena itu, penting untuk memahami potensi bahaya ini dan mengambil langkah-langkah preventif yang tepat (Amyotte, 2013).

Salah satu kondisi yang dapat menyebabkan terjadinya *Dust Explosion* adalah saat konsentrasi debu yang tersuspensi di udara mencapai batas *Minimum Explosive Concentration* (MEC) sesuai dengan karakteristik partikel. *Minimum Explosive Concentration* (MEC) adalah konsentrasi terendah dari partikel debu di udara yang dapat menyebabkan ledakan jika terdapat sumber penyulut. MEC bervariasi tergantung pada sifat kimia dan fisik dari debu tersebut. Metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) adalah alat yang penting untuk mensimulasikan dan menganalisis perilaku dispersi debu di udara. Dengan menggunakan CFD, para peneliti dapat memodelkan aliran udara dan distribusi konsentrasi partikel debu dalam lingkungan tertutup. Ini membantu dalam merancang sistem ventilasi yang efektif dan mengidentifikasi potensi area risiko di dalam warehouse. Simulasi CFD memungkinkan visualisasi skenario yang kompleks dan membantu dalam pengembangan strategi mitigasi yang lebih baik (Crowe, 2006).

Simulasi numerik menggunakan perangkat lunak *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menjadi alat yang sangat efektif dalam memodelkan aliran udara dan distribusi partikel debu di dalam suatu ruang. CFD memungkinkan kita untuk memahami bagaimana debu sekam padi menyebar di dalam warehouse dengan dipengaruhi oleh kecepatan angin tertentu, mengidentifikasi area dengan konsentrasi debu tinggi, serta menganalisis pengaruh berbagai parameter seperti ukuran partikel, kecepatan aliran udara, dan lokasi sumber emisi debu. Melalui simulasi ini, kita dapat memvisualisasikan pola aliran dan distribusi debu sehingga dapat diambil langkah-langkah preventif yang tepat untuk mengurangi risiko ledakan. Dengan menggunakan CFD, para peneliti dapat memodelkan aliran udara dan distribusi partikel debu dalam lingkungan tertutup. Ini membantu dalam merancang sistem ventilasi yang efektif dan mengidentifikasi potensi area risiko di dalam warehouse. CFD memungkinkan visualisasi skenario yang kompleks dan membantu dalam pengembangan strategi mitigasi yang lebih baik. Misalnya, CFD dapat digunakan untuk mensimulasikan berbagai kondisi operasional dan mengevaluasi efektivitas desain ventilasi dalam mengurangi konsentrasi debu di udara. CFD juga dapat membantu dalam memahami bagaimana partikel debu terdispersi setelah terjadi ledakan, yang penting untuk perencanaan tanggap darurat dan penilaian risiko (Zhou et al., 2019).

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengembangkan model simulasi numerik yang lebih akurat dan efisien dalam memprediksi konsentrasi debu. Misalnya, Chen et al. (2019) menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk mempelajari distribusi partikel debu di sekitar lokasi konstruksi, menunjukkan bahwa kecepatan angin dan penghalang fisik seperti bangunan dapat mempengaruhi pola dispersinya. Selain itu, studi oleh Zhang et al. (2020) mengeksplorasi penggunaan model Gaussian untuk memprediksi konsentrasi debu di daerah perkotaan, dengan hasil yang menunjukkan akurasi yang tinggi dalam kondisi meteorologi yang bervariasi.

Pentingnya penelitian ini tidak hanya terbatas pada aspek keselamatan kerja di warehouse biomassa, tetapi juga pada peningkatan efisiensi dan pengelolaan risiko dalam industri energi terbarukan. Dengan memahami dan mengidentifikasi potensi bahaya ledakan debu sekam padi, kita dapat mengembangkan strategi mitigasi yang efektif dan memastikan bahwa warehouse biomassa dioperasikan dengan standar keselamatan yang tinggi. Hal ini tidak hanya melindungi aset dan pekerja tetapi juga mendukung keberlanjutan dan keberhasilan penggunaan biomassa sebagai sumber energi alternatif. Penelitian mengenai ledakan debu telah banyak dilakukan dalam berbagai konteks industri, terutama di sektor pertanian dan manufaktur. Beberapa penelitian menggunakan simulasi numerik untuk memodelkan distribusi debu dan mengidentifikasi zona berbahaya. Namun, penelitian yang spesifik pada sekam padi sebagai biomassa masih terbatas, sehingga studi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi yang berarti dalam literatur ilmiah dan praktik industri.

2. METODE

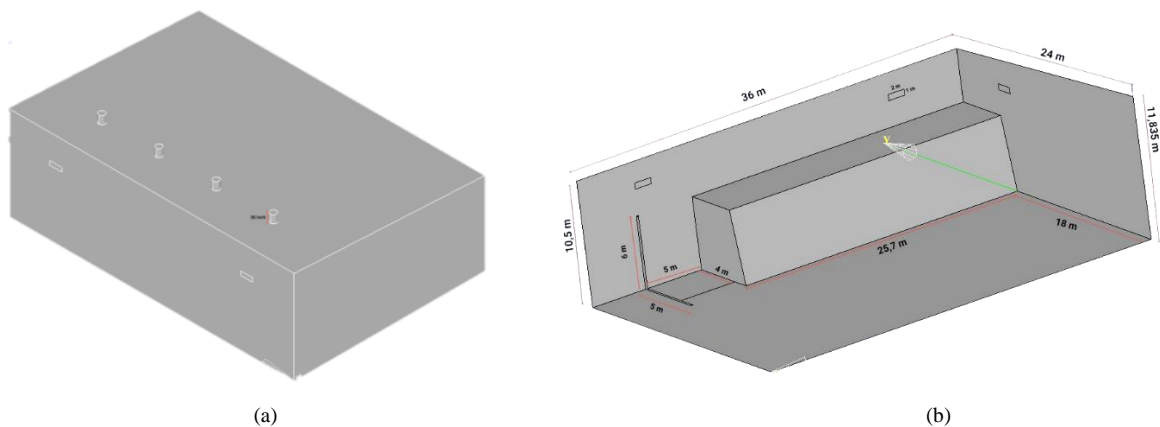
Penelitian dispersi konsentrasi debu untuk mengidentifikasi potensi bahaya *dust explosion* debu sekam padi di warehouse biomassa ini menggunakan metode numerik *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Metodologi ini dibagi menjadi beberapa langkah utama sebagai berikut:

2.1 Pengumpulan Data

Data dimensi ukuran warehouse biomassa diperoleh dari dokumen layout perusahaan. Kecepatan angin harian rata-rata diperoleh website BMKG (BMKG, 2023). Data distribusi ukuran partikel debu dibutuhkan untuk memprediksi diameter partikel debu yang tersebar di warehouse. Pengambilan data ukuran partikel debu dilakukan dengan mengambil sampel debu di warehouse, kemudian diayak dengan menggunakan *sieve shaker* yang ada di laboratorium. Debu yang jatuh pada masing-masing ukuran mesh ditimbang dengan neraca analitik untuk menghasilkan pengukuran yang akurat. Data ukuran partikel debu tersebut kemudian dihitung dengan menggunakan persamaan *Rosin-Rammler* untuk mendapatkan distribusi konsentrasi debu (Vesilind, 1980). Laju aliran massa debu yang terbang di udara di dapat dari data operasional perusahaan kemudian dihitung dengan menggunakan persamaan *Dust Generation* yang dihitung berdasarkan rumus yang dianjurkan oleh Plinke (Plinke, 1995). Hasil perhitungan distribusi ukuran partikel, jumlah partikel, dan laju aliran massa kemudian diinputkan ke dalam file simulasi *reactingCloudProperties*.

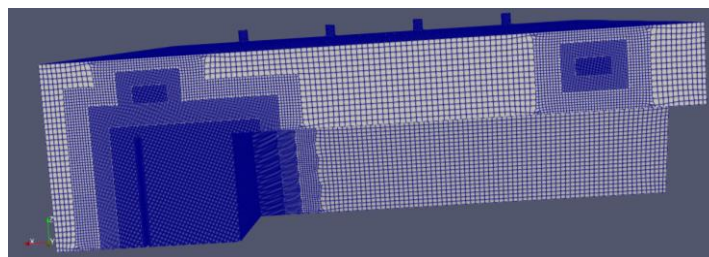
2.2 Pemodelan Geometri dan *Meshing*

Model geometri dari warehouse biomassa dibuat dengan menggunakan perangkat lunak Solidwork. Model ini mencakup semua detail penting seperti dimensi warehouse, letak ventilasi dan *cyclone*, ventilasi, *pile*, serta *moving floor* sebagai sumber keluarnya debu.



Gambar 1. Geometri warehouse: (a) Tampak depan, samping kanan, dan atas; (b) Tampak belakang, samping kiri, dan belakang

Ukuran pada model warehouse disesuaikan dengan dimensi warehouse yang sebenarnya, seperti yang terlihat di gambar 1. Tumpukan sekam padi (*pile*) disederhanakan modelnya karena dispersi debu tidak berasal dari tumpukan sekam padi melainkan dari debu di *moving floor*. Model warehouse ini akan dilakukan *meshing* dengan berbagai variasi ukuran mesh maksimum dan selanjutnya digunakan untuk simulasi persebaran konsentrasi debu di *OpenFoam*.



Gambar 2. *Adaptive meshing* dari model warehouse

Proses *meshing* mendiskritisasi model warehouse menjadi bagian-bagian yang lebih kecil. *CartesianMesh* adaptif yang ukurannya telah ditentukan menggunakan studi *grid independence* akan digunakan untuk studi

parameter. Ukuran mesh yang lebih kecil digunakan di sekitar ventilasi, *cyclone*, dinding pembatas, dan *moving floor* seperti yang ditunjukkan di Gambar. 2. Proses meshing dilakukan dengan menggunakan fungsi *CartesianMesh* dari *cfMesh*.

2.3 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Penelitian simulasi dispersi konsentrasi debu sekam padi di warehouse biomassa ini menggunakan metode numerik *Computational Fluid Dynamic* (CFD) dengan bantuan perangkat lunak OpenFOAM. CFD menyimulasikan gerak partikel berdasarkan pada suatu kondisi kecepatan dengan menggunakan dasar-dasar perhitungan fluida bergerak. Simulasi dilakukan untuk menghitung aliran udara di *cyclone* dan distribusi partikel debu di dalam warehouse. Simulasi CFD dilakukan melalui tiga tahapan, yaitu *preprocessing*, *solving*, dan *postprocessing*. Pada penelitian ini, untuk tahapan *preprocessing* menggunakan bantuan *software* SALOME, untuk tahap *solving* menggunakan *software* OpenFOAM, dan untuk tahap *postprocessing* menggunakan *software* ParaView.

Dalam studi ini, simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dilakukan untuk memodelkan aliran fluida yang mengandung partikel debu. Persamaan yang digunakan dalam simulasi ini adalah persamaan Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) yang dirumuskan sebagai berikut (Versteeg, 2007):

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right) \quad (1)$$

Di mana:

u adalah kecepatan (m/s),
 p adalah tekanan (Pa),
 ρ adalah densitas (kg/m³),
 μ adalah viskositas kinematik,

Metode Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) bertujuan untuk mendeskripsikan statistik aliran. Rata-rata waktu digunakan dalam pemodelan rata-rata Reynolds untuk mengurangi berbagai skala yang ada dalam aliran turbulen (Versteeg & Malalasekera, 2007). Waktu rata-rata ini jauh lebih besar daripada skala waktu terbesar dari fluktuasi turbulen, sehingga menghasilkan persamaan konservasi yang hanya menggambarkan evolusi kuantitas aliran rata-rata (Pope, 2000). Besaran aliran seperti kecepatan dan tekanan dibagi menjadi komponen rata-rata dan fluktuasi, berdasarkan dekomposisi Reynolds (Wilcox, 2006). Pengaruh fluktuasi turbulensi pada aliran rata-rata dimasukkan ke dalam tensor tegangan Reynolds (Wilcox, 2006).

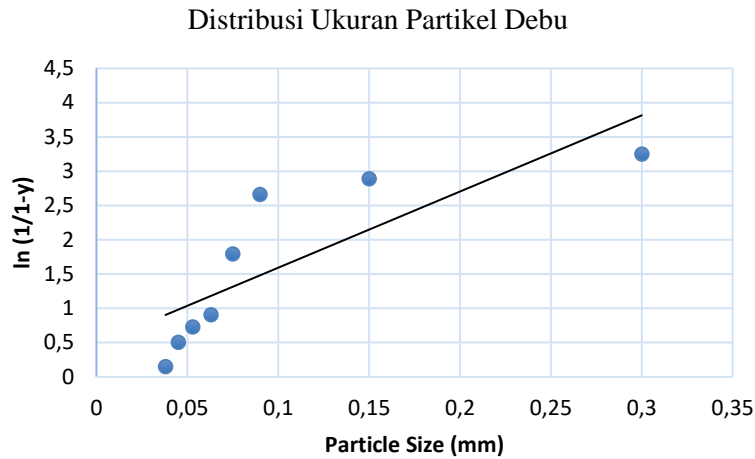
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Data dan Parameter Simulasi

Distribusi ukuran partikel adalah salah satu aspek penting dalam simulasi distribusi konsentrasi debu. Distribusi ukuran partikel akan memengaruhi massa partikel debu yang tersuspensi di udara. Dalam simulasi CFD ini, distribusi ukuran partikel debu harus dihitung dengan menggunakan metode Rossin-Rammler yang dikemukakan oleh Vesilind (Vesilind, 1980).

$$R(d) = 1 - \exp \left(- \left(\frac{d}{d_{63.2}} \right)^n \right) \quad (2)$$

Nilai n dan $d_{63.2}$ diinputkan ke dalam file *reactingCloudProperties* untuk memprediksi persebaran ukuran partikel debu sekam padi yang ada di warehouse biomassa.



Gambar 3. Grafik Distribusi Ukuran Partikel Debu

Tabel 1. Parameter yang digunakan dalam simulasi numerik

Parameter	Value
Rossin-Rammler particle size distribution ($d_{63,2}$)	6.425E-05 m
Kemiringan garis Rossin-Rammler particle size distribution (n)	1.206
Kecepatan aliran udara	5.5 m/s
Laju aliran massa debu	0.0361 kg/s

Pada tabel diatas, nilai n dan $d_{63,2}$ diperoleh dari perhitungan dengan menggunakan persamaan Rossin-Rammler untuk memprediksi distribusi ukuran partikel debu. Data laju aliran massa debu diperoleh dari perhitungan rasio *dust generation* yang digunakan untuk memperkirakan berapa banyak rasio debu yang kembali terbang/naik keatas setelah dijatuhkan dari ketinggian (h) (Plinke, 1995). Sedangkan data kecepatan aliran udara diperoleh dari salah satu kecepatan angin harian rata-rata di daerah sekitar warehouse biomassa selama 10 tahun terakhir. Kecepatan angin harian rata-rata yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebesar 5.5 m/s.

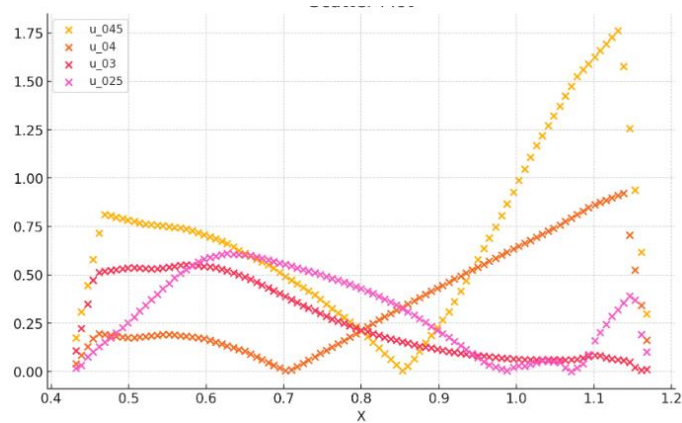
3.2 Hasil Validasi dan Grid Independen

Hasil simulasi variasi mesh maksimum perlu dilakukan uji keakuratan data agar bisa menentukan ukuran mesh maksimum yang akan digunakan untuk studi kasus. Dalam menguji keakuratan data dari hasil simulasi dilakukan analisis terhadap kecepatan aliran udara yang mengalir di *cyclone 1* yang akan dibandingkan dengan hasil dari ukuran mesh maksimum yang lain untuk mendapatkan nilai error yang paling minimum. Ukuran mesh maksimum dengan nilai error paling kecil atau mendekati 0 yang akan digunakan untuk simulasi studi kasus.

Nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) digunakan untuk mengetahui tingkat kesalahan hasil suatu prediksi. Apabila nilai RMSE mendekati 0 ataupun semakin kecil, maka hasil dari suatu prediksi akan semakin akurat. RMSE dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (Statology, 2020):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x-y)^2}{n}} \quad (3)$$

Dengan x adalah jumlah hasil %error antar mesh maksimum yang lebih besar, y adalah jumlah hasil %error mesh maksimum yang lebih kecil, dan n adalah banyak data.



Gambar 4. Kurva nilai Uz variasi ukuran mesh maksimum

Dapat dilihat pada Gambar 4, nilai Uz untuk ukuran *ukuran mesh maksimum* 0.3 dan 0.25 memiliki kurva yang berdekatan.

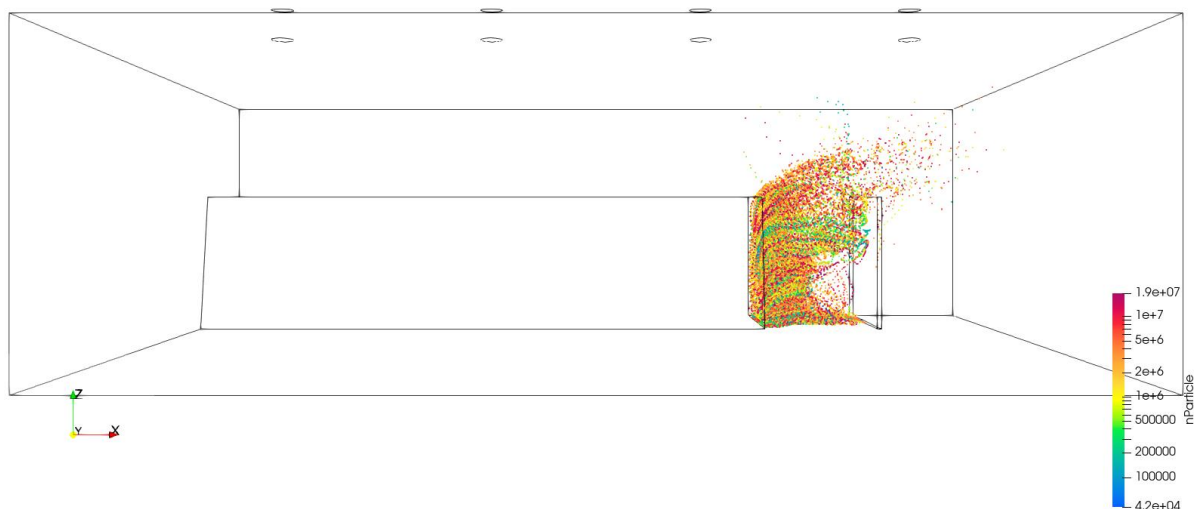
Tabel 2. Persentase *Root Mean Squared Error* (RMSE) nilai Uz dari variasi ukuran mesh maksimum

ΔU	% <i>Root Mean Square Error</i> (RMSE)
ΔU_1	6.69%
ΔU_2	9.54%
ΔU_3	3.7%

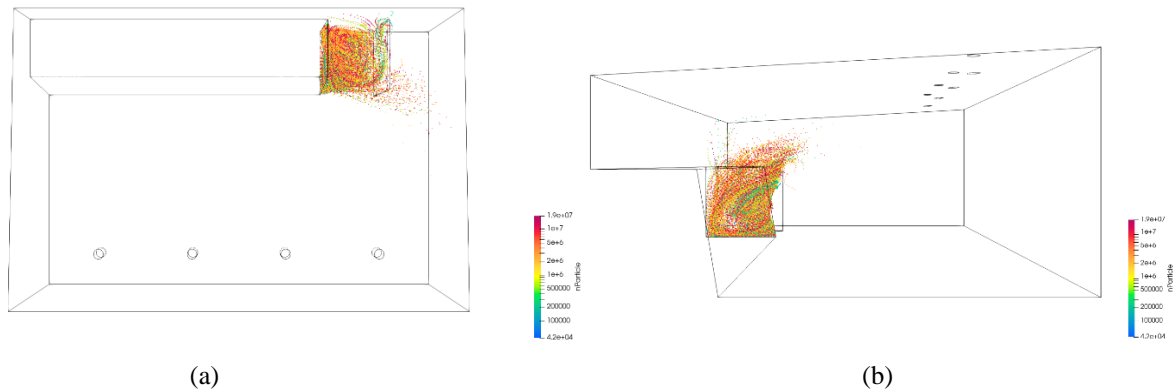
Tabel 2 di atas juga menunjukkan bahwa nilai persentase *Root Mean Square Error* (%RMSE) yang paling kecil adalah error absolut dari ukuran mesh maksimum 0.3 dan 0.25 yaitu sebesar 3.7% sehingga ukuran mesh maksimum yang dipilih adalah 0.3.

3.3 Hasil Simulasi Dispersi Debu

Data dan parameter yang telah dihitung disimulasikan pada model dengan ukuran mesh maksimum yang sudah dipilih. Simulasi dilakukan dengan perintah *simpleReactingParcelFoam* di OpenFoam. Gambar di bawah ini menunjukkan distribusi konsentrasi debu di dalam warehouse berdasarkan hasil simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

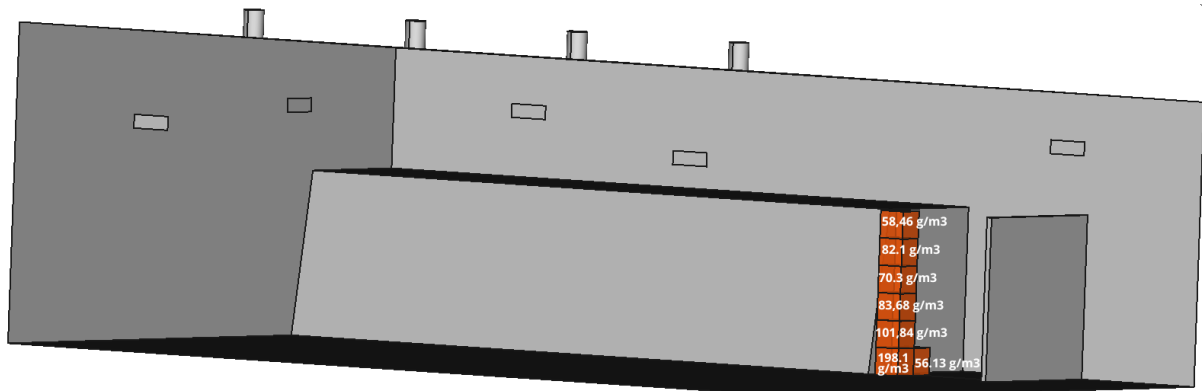


Gambar 5. Tampak Depan Hasil Simulasi di Paraview



Gambar 6. Visualisasi Hasil Simulasi: (a) Tampak atas; (b) Tampak samping

Gambar 5 di atas menunjukkan bahwa debu sekam padi yang naik ke atas melalui *moving floor*, terjebak di area *moving floor* sehingga menimbulkan *dust cloud* (awan debu) yang cukup parah di area tersebut. Terlebih lagi adanya partisi (dinding pembatas) di antara kedua sisi *moving floor* yang membuat debu terjebak dan tentu dapat menimbulkan risiko bahaya *dust explosion* (ledakan debu) jika *dust cloud* di area *moving floor* tersebut mendapatkan sumber penyalan. Dalam penelitian ini, peneliti membagi setiap segmen volume dengan ukuran 1m^3 untuk mempermudah perhitungan konsentrasinya. Berikut adalah gambar area konsentrasi berbahaya di warehouse biomassa yang ditandai dengan kotak berwarna merah.



Gambar 7. Distribusi Konsentrasi Debu di Warehouse Biomassa

Grafik di atas menunjukkan bahwa konsentrasi debu tertinggi berada di sekitar titik emisi debu utama, yaitu di salah satu titik area *moving floor* dengan nilai konsentrasi debu 198.1 g/m^3 . Angka tersebut telah memenuhi *Minimum Explosive Concentration* (MEC) dari komponen utama debu sekam padi, yaitu *cellulose*, yang memiliki nilai 55 g/m^3 (Kowhakul, 2018). Selain itu, titik dengan konsentrasi tinggi dan telah memenuhi MEC juga berada di sekitar *moving floor* dengan konsentrasi debu sebesar 101.84 g/m^3 , 83.68 g/m^3 , 70.3 g/m^3 , 82.1 g/m^3 , dan 58.46 g/m^3 yang dapat dilihat pada gambar 7. Selanjutnya, hasil simulasi pada konsentrasi debu di area lain cenderung rendah seiring dengan jarak dari titik emisi dan sirkulasi udara yang baik di beberapa bagian warehouse membantu dalam mengurangi akumulasi debu. Adanya 2 partisi (dinding pembatas) di samping *moving floor* membuat debu tidak bisa tersirkulasi dengan baik sehingga terakumulasi menjadi *dust cloud* (awan debu).

4. KESIMPULAN

Hasil dari simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dispersi konsentrasi debu di warehouse biomassa mengidentifikasi adanya temuan konsentrasi yang memenuhi terjadinya *Dust Explosion* di beberapa titik area *moving floor*. Konsentrasi debu yang memenuhi MEC berkisar antara $58.46\text{--}198.1\text{ g/m}^3$ karena *moving floor* merupakan area sumber debu (*dust source*) dan debu terhalang oleh partisi (dinding pembatas) sehingga membentuk *dust cloud* (awan debu) yang *explosible* jika mendapatkan sumber penyalan (*ignition source*). Ledakan debu sangat mudah mengalami deflagrasi jika mendapatkan sumber penyalan sehingga perlu dilakukan tindakan preventif untuk menghindari terjadinya ledakan.

Implementasi rekomendasi yang disarankan dapat membantu dalam mengurangi risiko dan meningkatkan keselamatan kerja di warehouse biomassa. Temuan ini menunjukkan pentingnya pengendalian debu yang efektif di warehouse biomassa. Beberapa rekomendasi yang dapat diterapkan untuk mengurangi risiko ledakan debu meliputi:

- a. Peningkatan Sistem Ventilasi: Memastikan sirkulasi udara yang baik di seluruh area warehouse untuk mengurangi konsentrasi debu.
- b. Pembersihan Rutin: Membersihkan akumulasi debu secara rutin untuk mencegah peningkatan konsentrasi debu di udara.
- c. Penerapan Prosedur Keselamatan: Menerapkan prosedur keselamatan yang ketat, termasuk pelatihan pekerja mengenai bahaya debu dan tindakan pencegahan.
- d. Menjauhkan instalasi yang dapat menimbulkan percikan api jauh dari *moving floor*.

DAFTAR PUSTAKA

- Amyotte, P. R. (2013). *An Introduction to Dust Explosions: Understanding the Myths and Realities of Dust Explosions for a Safer Workplace*. Butterworth-Heinemann.
- Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). (2023). Data Kecepatan Angin Harian Maksimum dan Rata-Rata. <https://dataonline.bmkg.go.id/home> diakses 5 Januari 2024.
- Carson, D. J., & Mumford, S. R. (2018). *Dust Explosion Prevention and Protection: A Practical Guide*. IChemE.
- Chen, X., Li, Y., & Zhang, H. (2019). Numerical simulation of dust dispersion in construction sites. *Journal of Environmental Management*, 250, 109525.
- Crowe, C. T. (2006). *Multiphase Flow Handbook*. CRC Press.
- Eckhoff, R. K. 2003. *Dust Explosions in the Process Industries*, 3rd ed. Gulf Professional Publishing/Elsevier; Boston,
- Eckhoff, R. K. (2009). *Dust Explosions in the Process Industries*. Gulf Professional Publishing.
- Huésca Medina, C., Maccoitir, B., Sattar, H., Slatter, D. J. F., Phylaktou, H. N., Andrews, G. E., & Gibbs, B. M. (2015). Comparison of the explosion characteristics and flame speeds of pulverised coals and biomass in the ISO standard 1 m³ dust explosion equipment. *Fuel*, 151, 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.01.009>
- Kowhakul, W., Shibara, H., Masamoto, H., Shigematsu, H. (2018). Dust Explosion Characteristics of Cellulose Acetates with Different Degrees of Acetylation. *Annual International Symposium: Texas*
- Marc A.E. Plinke , David Leith , Maryanne G. Boundy & Friedrich Löffler. (1995). Dust Generation from Handling Powders in Industry, *American Industrial Hygiene Association Journal*, 56:3, 251-257, DOI: 10.1080/15428119591017088
- Pope, S. B. (2000). *Turbulent Flows*. Cambridge University Press.
- Statologi. (2020). How to Calculate Root Mean Square Error (RMSE) in Excel. <https://www.statology.org/root-mean-square-error-excel/> diakses pada 26 Juni 2024.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson Education
- Vesilind. (2020). *The Rossin-Rammler Particle Size Distribution*. Duke University: North Carolina.
- Wang, Y., Zhang, Y., & Li, Q. (2021). Numerical Simulation and Experimental Study on the Explosion Characteristics of Agricultural Dusts. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 64, 104068.
- Wilcox, D. C. (2006). *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries.
- Xu, H., Zhu, W., & Deng, H. (2020). Influence of Particle Size on the Explosibility Characteristics of Coal Dust: A CFD Study. *Powder Technology*, 366, 88-96.
- Zhang, Y., Wang, L., & Liu, Q. (2020). Gaussian model for urban dust dispersion: A case study. *Atmospheric Environment*, 231, 117487.
- Zhou, L., Zhang, X., & Li, Y. (2019). CFD Simulation of Dust Dispersion and Explosion in a Closed Space. *Process Safety and Environmental Protection*, 132, 1-10.