



Sebaran *Particulate Matter* (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, PM_{0.1}) di SMP Negeri 1 Kota Jambi Menggunakan Model CFD (*Computational Fluid Dynamics*)

Febri Juita Anggraini¹, Annisa Shalsabila², Zuli Rodhiyah³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi, Jambi, Indonesia

Email: ¹febri_juita@unj.ac.id, ²annisashalsabila379@gmail.com, ³zuli.rodhiyah@unj.ac.id

Abstract

One source that contributes greatly to urban air quality is traffic. The proximity of schools to vehicles will put students at greater risk of exposure to high concentrations of particulate matter. SMP Negeri 1 Jambi City is an education center located in an urban area and adjacent to a busy road. CFD models are good at modeling the movement of pollutants in urban areas by taking into account the influence of buildings. The purpose of this study is to determine the concentration of PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, and PM_{0.1} at SMPN 1 Jambi City based on direct measurement results and CFD modeling results and then see how accurate the modeled PM concentrations are when compared to the results of direct measurements. The results showed that the average concentrations of PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, and PM_{0.1} from direct measurements were 20.66 µg/m³, 11.79 µg/m³, 8.74 µg/m³, and 1.96 µg/m³, respectively, while the modeling results showed lower average concentrations. The ratio of the difference between the measured and modeled PM concentrations is in the range of 11.67 - 233.45% and with the percentage of RMSPE obtained >30% (invalid), where the requirement for a modeling to be valid so that the results can be trusted in explaining the actual phenomenon is when the validity percentage is <30%.

Keywords: *Particulate Matter, Dispersion Modelling, COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

Abstrak

Salah satu sumber yang berkontribusi besar terhadap kualitas udara perkotaan adalah lalu lintas. Lokasi sekolah yang berdekatan dengan kendaraan akan mengakibatkan para siswa lebih beresiko terpapar partikulat dengan konsentrasi tinggi. SMP Negeri 1 Kota Jambi merupakan pusat pendidikan yang berlokasi di daerah perkotaan dan berdekatan dengan jalan yang sibuk. Model CFD baik dalam memodelkan pergerakan polutan daerah perkotaan dengan memperhitungkan pengaruh bangunan. Tujuan penelitian ini yaitu untuk mengetahui konsentrasi PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, dan PM_{0.1} di SMPN 1 Kota Jambi berdasarkan hasil pengukuran langsung dan hasil pemodelan CFD kemudian melihat seberapa akurat konsentrasi PM hasil pemodelan jika dibandingkan dengan hasil dari pengukuran langsung. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata konsentrasi PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, dan PM_{0.1} hasil pengukuran langsung masing – masing adalah 20,66 µg/m³, 11,79 µg/m³, 8,74 µg/m³, dan 1,96 µg/m³, sedangkan hasil pemodelan menunjukkan konsentrasi rata-rata yang lebih rendah. Rasio perbedaan konsentrasi PM hasil pengukuran dan pemodelan dalam rentang 11,67 – 233,45 % dan dengan persentase RMSPE yang didapatkan >30% (tidak valid), di mana syarat agar suatu pemodelan dikatakan valid sehingga dapat dipercaya hasilnya dalam menjelaskan fenomena yang terjadi sebenarnya adalah ketika persentasenya <30%.

Kata Kunci: *Particulate Matter, Model Dispersi, COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

1. PENDAHULUAN

Pemodelan dispersi atau sebaran adalah simulasi matematis tentang bagaimana polutan udara menyebar dan bereaksi di atmosfer. Pemodelan membantu memperkirakan

hubungan antara sumber polusi dan pengaruhnya terhadap kualitas udara ambien. Pemodelan sebaran juga dapat digunakan untuk memprediksi konsentrasi di lokasi reseptor tertentu dengan masukan berupa informasi mengenai emisi dan data meteorologi yang relevan (EPA, 2022). *Particulate matter* (PM) merupakan salah satu jenis polutan yang mempengaruhi kualitas udara (Slezakova *et al.*, 2013). PM umumnya diklasifikasikan berdasarkan ukuran partikel yaitu PM₁₀ (*coarse particles*), PM_{2,5} (*fine particles*), PM₁ dan PM_{0,1} (*ultrafine particles*) (Lara, 2015).

Setiap individu berpotensi mengalami efek kesehatan tersebut jika berada dalam lingkungan dengan kondisi kualitas udara yang buruk, terutama pada individu yang masih dalam tahap pertumbuhan (Gauderman *et al.*, 2004). Siswa SMP merupakan individu yang umumnya berusia 13 – 15 tahun (Kemdikbud, 2021) yang menurut Gauderman *et al.* (2004) termasuk kelompok usia dengan risiko penurunan fungsi saluran pernapasan akibat polutan di udara. Lalu lintas menjadi salah satu sumber yang berkontribusi besar terhadap kualitas udara perkotaan. Lokasi sekolah yang berdekatan dengan jalan raya menjadikan siswa lebih dekat dengan kendaraan, terpapar langsung dengan polutan akibat lalu lintas, dan memiliki waktu paparan yang lebih tinggi karena siswa sekolah biasanya akan menghabiskan hampir sebagian hari mereka di sekolah (Lara, 2015).

SMP Negeri 1 Kota Jambi berlokasi di Jalan Dr. Cipto Mangun Kusumo, Kelurahan Pasar Jambi. Sekolah ini berlokasi di dekat lalu lintas jalan serta terletak berdekatan dengan prasarana publik yang ramai seperti tempat peribadatan, rumah sakit, perbankan, serta tempat komersial lainnya. Pemantauan konsentrasi PM dan memprediksi konsentrasinya di berbagai skenario polusi yang parah adalah salah satu bagian penting dalam pengendalian kualitas udara di kota-kota, terutama di pusat-pusat populasi seperti di dekat jalan yang sibuk, di pusat kota, atau di lokasi yang menjadi perhatian khusus seperti tempat pendidikan (EPA, 2021). Prediksi konsentrasi dan persebaran PM dapat dilakukan dengan metode perhitungan matematis melalui simulasi atau pemodelan. Kelebihan pemodelan CFD yaitu memungkinkan simulasi pergerakan polutan udara yang akurat pada skala spatiotemporal yang sangat kecil, mampu menangani topografi yang kompleks, memperhitungkan pengaruh bangunan, dan variabilitas meteorologi atau emisi (Tiwary *et al.*, 2019).

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Tahapan Penelitian

Penelitian yang dilakukan melalui beberapa tahap yaitu:

1. Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel udara dilakukan dengan menggunakan alat *Ambient Nano Sampler*. Selain itu dalam pelaksanaan pengambilan sampel juga dilakukan pengukuran data meteorologi di titik *sampling* yang meliputi kecepatan dan arah angin, kelembaban udara, dan suhu serta juga dilakukan penghitungan kendaraan yang melintas saat *sampling* dilakukan.

2. Mengolah Data Hasil Pengukuran Langsung

Sampel udara yang didapatkan ditimbang dengan menggunakan neraca analitik kemudian dilakukan perhitungan untuk mengetahui masing masing konsentrasi PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁, dan PM_{0,1}. Persamaan yang digunakan dalam menghitung konsentrasi PM sebagai berikut:

$$C = \frac{W_2 - W_1}{V_{std}} \times 10^6 \quad (1)$$

Keterangan : C = konsentrasi massa partikel (ug/Nm³) ; W₁= berat *filetr* akhir (g)
V_{std}= volume contoh uji dalam keadaan standar (Nm³) ; 10⁶= konversi gram (g) ke mikrogram.

3. Melakukan Pemodelan

Pemodelan sebaran dengan model CFD dilakukan dengan menggunakan *software Ansys Fluent*.

4. Validasi Hasil Pemodelan

Validasi hasil pemodelan dilakukan dengan membandingkan konsentrasi hasil pemodelan dengan konsentrasi hasil pengukuran, dari sini diketahui apakah hasil pemodelan valid atau tidak. Adapun persamaan yang digunakan dalam menentukan validitas model adalah sebagai berikut:

$$RMSPE = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{F_j - A_j}{A_j}\right)^2\right)} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan : F_j = hasil pemodelan, A_j = hasil pengukuran, n = jumlah pengukuran. Menurut Despotovic (2016) akurasi model dianggap sangat baik ketika $RMSPE < 10\%$, baik jika $RMSPE 10-20\%$, cukup jika $RMSPE 20-30\%$ dan buruk jika nilai $RMSPE > 30\%$.

2.2. Jenis dan Sumber Data

Umumnya data berdasarkan sumber terbagi menjadi dua jenis, yaitu data primer dan data sekunder. Data primer dalam penelitian ini merupakan data yang diukur secara langsung saat penelitian dilakukan. Adapun data primer tersebut adalah (1) konsentrasi PM (PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 , dan $PM_{0.1}$). Setiap konsentrasi partikulat diketahui dengan melakukan pengambilan sampel partikulat menggunakan alat *Ambient Nano Sampler* (ANS), kemudian setelah melalui perhitungan dari hasil *sampling* diketahui konsentrasi masing – masing PM; (2) jumlah kendaraan yang diperoleh dengan menghitung secara manual kendaraan yang melintas di lokasi *sampling*. Jumlah kendaraan diperlukan dalam perhitungan beban emisi partikulat yang merupakan *input* dalam pemodelan.

Data sekunder dalam penelitian ini merupakan sebagai *input* pemodelan sebaran yang akan dilakukan. Adapun data sekunder dalam penelitian ini yaitu : (1) peta SMP Negeri 1 Kota Jambi dalam bentuk peta 3 dimensi diperlukan dalam pendefinisian geometri area studi dalam pemodelan sebaran nantinya; (2) data meteorologi sebagai *input* pemodelan diperoleh dari data *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) yang dapat diakses di situs <https://cds.climate.copernicus.eu/>.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Menurut Rumanov (2020), untuk pemodelan sebaran di area perkotaan dengan jarak sumber pencemar < 1 km, model CFD lebih direkomendasikan untuk digunakan. Tahapan simulasi dengan *Ansys Fluent* ini terdiri dari *pre-processing* (pembuatan geometri, penentuan domain dan *meshing*); *processing* (pemilihan *viscous model*, *input* informasi emisi pada *Discrete Phase Model*, dan pengaturan *boundary condition*); dan *postprocessing*. Data yang diperlukan dalam melakukan pemodelan CFD yaitu: geometri wilayah studi dalam bentuk 3 dimensi (3D), data emisi (jenis polutan, beban emisi dan sumber emisi), dan data meteorologi.

Viscous model yang digunakan adalah model turbulensi k-epsilon. Menggunakan model turbulensi k-epsilon dalam simulasi *Ansys* untuk area perkotaan dapat memberikan hasil yang lebih akurat dan lebih baik menangkap pola aliran kompleks dan karakteristik turbulensi yang ada di lingkungan tersebut (Wang *et al.*, 2018). Perhitungan beban emisi PM_{10} dilakukan berdasarkan rumus oleh Kementerian Lingkungan Hidup (2013) yang

ditampilkan pada persamaan (3) dan (4), sedangkan perhitungan beban emisi untuk PM_{2,5}, PM₁, dan PM_{0,1} dilakukan dengan menggunakan perhitungan oleh *European Environment Agency* (EEA, 2019) yang ditampilkan pada persamaan (5).

$$VKT_{j \text{ line}} = \sum_{i=1}^n Q_{ji} l_i \quad (3)$$

$$E_{cji} = VKT_{ji} EF_{cj} (100 - C) / 100 \quad (4)$$

Keterangan : VKT_{j line} = VKT kategori kendaraan j pada ruas jalan i yang dihitung sebagai sumber garis (km/tahun) ; Q_{ji} = volume kendaraan dalam kategori j pada ruas jalan i (kendaraan/tahun) ; l_i = panjang ruas jalan i (km) ; E_{cji} = emisi pencemar c untuk kendaraan kategori j pada ruas jalan I ; EF_{cj} = faktor emisi pencemar c untuk kendaraan kategori j (g/km) ; C = efisiensi peralatan pengendali emisi (%), 0 (apabila tidak terpasang peralatan pengendali).

$$TE = \sum_j N_j \times M_j \times EF_{TSP,j} \times f_i \times S(V) \quad (5)$$

Keterangan : TE = emisi total untuk periode waktu dan batas spasial yang ditentukan [g] ; N_j = jumlah kendaraan dalam kategori j dalam batas ruang yang ditentukan ; M_j = jarak tempuh [km] yang dikendarai oleh setiap kendaraan dalam kategori j selama periode waktu yang ditentukan ; EF_{TSP,j} = faktor emisi massa TSP (atau partikel ukuran terbesar saat *sampling*) untuk kendaraan dalam kategori j [g/km] ; f_i = fraksi massa TSP yang dapat dikaitkan dengan kelas ukuran partikel I ; S (V) = koreksi untuk rata-rata kecepatan perjalanan kendaraan, kelas ukuran partikel i adalah TSP, PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁ dan PM_{0,1}.

3.1 Konsentrasi *Particulate matter* di SMP Negeri 1 Kota Jambi

Lokasi pengambilan sampel *Particulate matter* (PM) dilaksanakan di SMP Negeri 1 Kota Jambi. Lokasi titik *sampling* berjumlah dua titik, titik pertama dengan koordinat 1°35'32.99"S dan 103°37'5.49"T terletak di depan gerbang sekolah dan berlokasi dekat dengan jalan dengan jarak hanya 2,8 meter. Titik ini mempresentasikan paparan partikulat dari aktivitas lalu lintas sebelum adanya efek bangunan yang mempengaruhi sebaran partikulat. Titik kedua dengan koordinat 1°35'31.23"S dan 103°37'5.00"T terletak di halaman sekolah. Pengambilan sampel dilaksanakan selama 2 x 24 jam pada hari Rabu – Kamis tanggal 23 – 24 Desember 2021 (pengukuran ke-1) dan hari Sabtu – Minggu tanggal 25 – 26 Desember 2021 (pengukuran ke-2).



Gambar 1. Lokasi Pengambilan Sampel

Adapun Konsentrasi PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁, dan PM_{0,1} hasil pengukuran langsung di SMP Negeri 1 Kota Jambi ditampilkan oleh Tabel 1.

Tabel 1. Konsentrasi PM di SMP Negeri 1 Kota Jambi.

Parameter	Konsentrasi Partikulat (µg/m³)				Rata – rata
	Pengukuran 1		Pengukuran 2		
	GS	HS	GS	HS	
PM ₁₀	19,20	20,84	18,74	23,86	20,66
PM _{2,5}	12,70	10,15	10,62	13,68	11,79
PM ₁	9,91	7,15	8,42	9,47	8,74
PM _{0,1}	2,05	1,89	1,45	2,44	1,96
Keterangan: GS = Gerbang Sekolah HS = Halaman Sekolah					

Faktor – faktor yang dapat mempengaruhi sebaran partikulat di udara antara lain yaitu kondisi meteorologi terutama curah hujan, kecepatan dan arah angin; keberadaan bangunan; dan banyaknya sumber pencemar (Amalia & Marshita, 2021; Kumaat, 2004; Tiwary *et al.*, 2019). Curah hujan, kecepatan dan arah angin berhubungan dengan mekanisme penghilangan, penyebaran dan transportasi PM di udara (Amalia & Marshita, 2021). Keberadaan bangunan memiliki peran sebagai penghalang dalam perpindahan PM (Chaisri & Ponpesh, 2022). Tingkat pertukaran udara yang dipengaruhi oleh celah antara bangunan atau pada bangunan akan sangat mempengaruhi konsentrasi PM. Tingkat pertukaran udara yang tinggi akan mengurangi akumulasi PM di suatu lokasi, sehingga konsentrasi PM di udara lebih rendah dibandingkan dengan lokasi yang memiliki tingkat pertukaran udara yang buruk (Zhang & Zhu, 2012).

Titik *sampling* gerbang sekolah (GS) berjarak 2,8 – 4,6 meter dari jalan. Pengukuran pada titik ini dapat mempresentasikan pengaruh langsung aktivitas lalu lintas terhadap konsentrasi PM. Berdasarkan Tabel 1, konsentrasi PM pada titik *sampling* GS yang diukur pada pengukuran ke -1 (hari sekolah) lebih tinggi dibandingkan dengan yang diukur pada pengukuran ke-2 (libur sekolah). Hal ini dikarenakan jumlah kendaraan saat pengukuran ke-1 lebih banyak (22.242 kendaraan/hari) dibandingkan saat pengukuran ke-2 (20.979 kendaraan/hari). Semakin banyak sumber yang menghasilkan polusi maka akan semakin buruk kualitas udara pada lokasi tersebut (Kumaat, 2004).

Titik *sampling* halaman sekolah (HS) merupakan lokasi pengukuran yang berjarak 42 meter dari titik *sampling* GS. Lokasi ini dilingkupi oleh bangunan – bangunan sekolah. Meskipun dibatasi oleh bangunan, emisi PM dari aktivitas lalu lintas tetap dapat masuk ke halaman sekolah terutama melalui jendela, pintu, dan ventilasi pada bangunan kelas yang berada di depan titik *sampling* HS, pada bangunan tersebut terdapat 7 pintu, 14 jendela, dan 21 ventilasi yang masing – masing terletak pada sisi depan dan belakang bangunan (setiap kelas terdapat 2 pintu, 4 jendela, dan 6 ventilasi). Pintu dan jendela di kedua sisi kelas dibuka saat kegiatan belajar mengajar, sedangkan saat libur sekolah pintu dan jendela kelas ditutup sepenuhnya.

Tingginya konsentrasi PM pada titik *sampling* HS dibandingkan pada titik *sampling* GS, terutama pada saat pengukuran ke – 2 disebabkan oleh faktor tingkat pertukaran udara dan arah angin dominan. Titik *sampling* GS, meskipun dekat dengan sumber pencemar, namun mempunyai medan angin yang lebih bebas sehingga tingkat pertukaran udaranya lebih tinggi dibandingkan pada titik *sampling* HS yang dilingkupi oleh bangunan – bangunan sekolah sehingga aliran udara menjadi terhambat. Arah angin dominan saat pengukuran juga menunjukkan angin yang cenderung menuju ke arah SMPN 1 yaitu utara dan utara barat laut (Gambar 2). Arah angin dominan memiliki pengaruh terhadap penyebaran PM di suatu wilayah, jika arah angin dominan bertiup dari

sumber ke daerah tertentu maka akan menyebabkan peningkatan konsentrasi PM di wilayah yang dilaluinya tersebut (Tiwary *et al.*, 2019).



Sumber pencemar yang dimodelkan hanya berasal dari emisi kendaraan sesuai dengan perhitungan beban emisi. Data meteorologi (*boundary condition*) terdiri dari data data kecepatan dan arah angin (dalam bentuk komponen angin), kelembaban, dan suhu yang ditulis dalam *source code*. Visualisasi hasil pemodelan dilakukan dengan *software Tecplot 360*. Konsentrasi PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁, dan PM_{0,1} dari hasil pemodelan untuk titik *sampling* GS dan HS dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Konsentrasi PM Hasil Pemodelan CFD

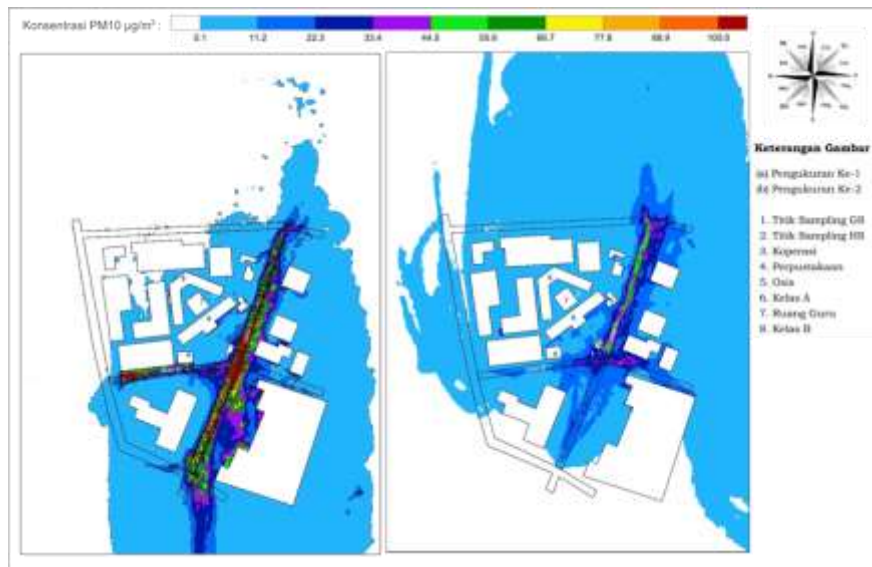
Parameter	Konsentrasi Partikulat (µg/m³)				Rata – rata (µg/m³)
	Pengukuran 1		Pengukuran 2		
	GS	HS	GS	HS	
PM ₁₀	21,44	0,51	26,54	1,49	12,50
PM _{2,5}	18,46	0,41	20,00	1,42	10,07
PM ₁	13,10	0,34	12,26	1,07	6,69
PM _{0,1}	4,18	0,12	4,69	0,37	2,34

Keterangan:

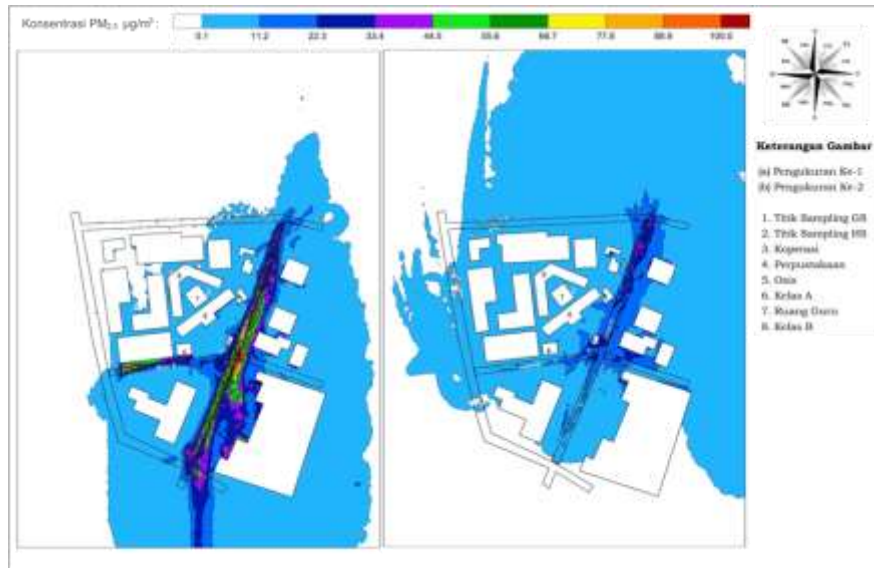
GS = Gerbang Sekolah

HS = Halaman Sekolah

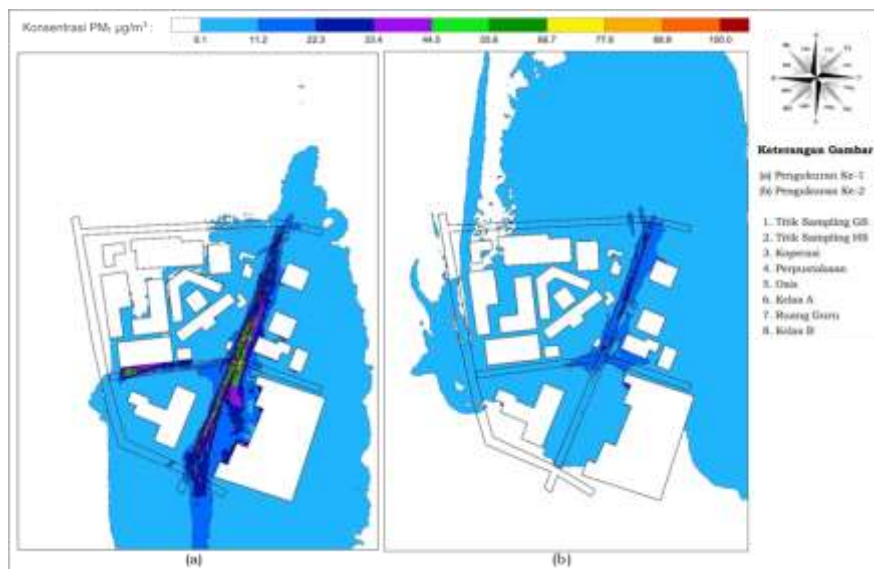
Adapun visualisasi sebaran PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁, dan PM_{0,1} di SMP Negeri 1 Kota Jambi dan sekitarnya ditampilkan oleh Gambar 3 – Gambar 6.



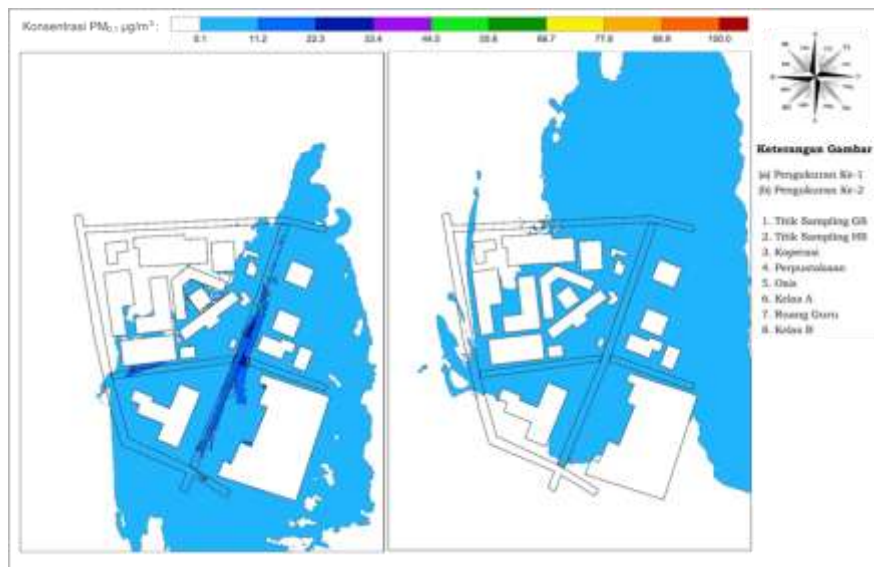
Gambar 4. Sebaran PM10 Hasil Pemodelan CFD



Gambar 5. Sebaran $PM_{2.5}$ Hasil Pemodelan CFD



Gambar 6. Sebaran PM_1 Hasil Pemodelan CFD

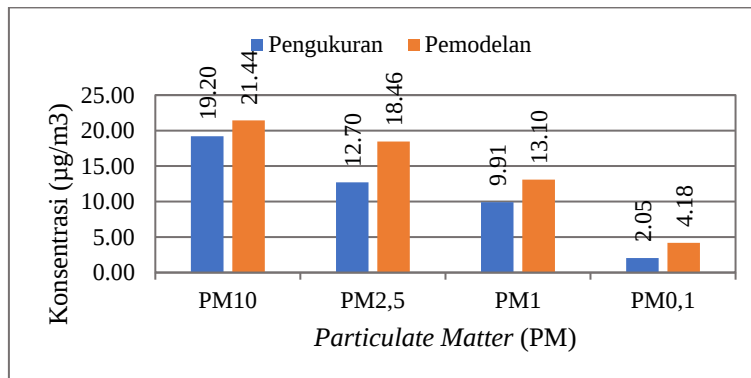


Gambar 7. Sebaran $PM_{0.1}$ Hasil Pemodelan CFD

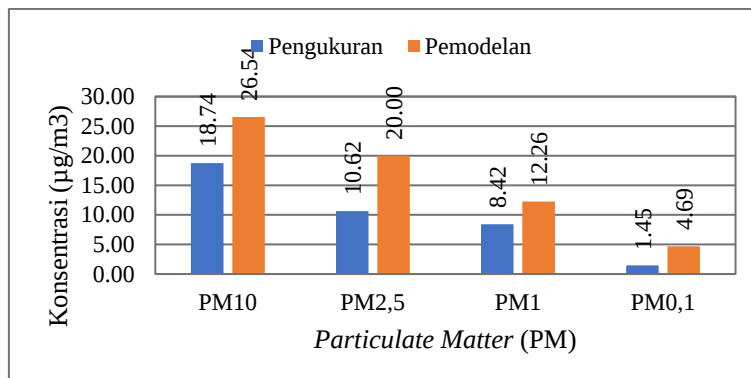
3.3 Validasi Hasil Model dengan Uji *Root Mean Square Percent Error* (RMSPE)

Komparasi hasil prediksi dengan hasil pengukuran langsung penting dilakukan untuk mengevaluasi akurasi model. Semakin kecil perbedaan antara keduanya, semakin baik hasil dari pemodelan yang dilakukan. Akurasi hasil pemodelan sebaran partikulat dengan CFD dari penelitian – penelitian sebelumnya menunjukkan hasil yang beragam. Garcia *et al.* (2013) menemukan hasil model lebih rendah dibandingkan dengan konsentrasi partikulat sebenarnya dengan rasio perbedaan sebesar 14-35%, perbedaan signifikan ini disebabkan oleh data yang *diinput* yang kurang baik.

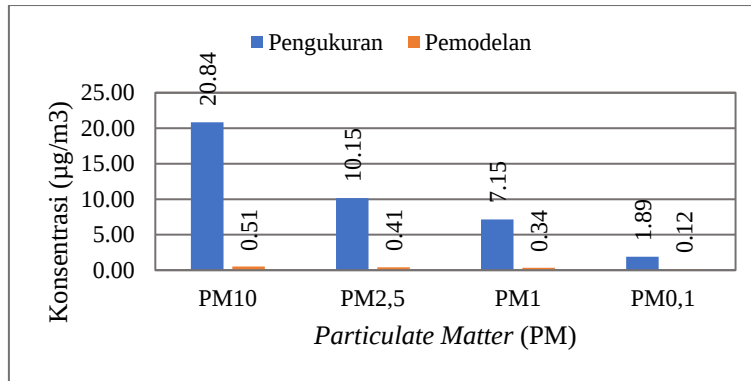
Pospisil *et al.* (2020) mendapatkan hasil model yang menunjukkan konsentrasi partikulat yang juga lebih rendah dibandingkan dengan konsentrasi sebenarnya dengan rasio perbedaan sebesar 52-136%, tetapi meskipun terdapat perbedaan yang signifikan, tren yang ditunjukkan oleh hasil pemodelan sesuai dengan tren hasil pengukuran langsung. Chaisri & Ponpesh, (2022) menemukan hasil pemodelan lebih tinggi dibandingkan dengan data pengukuran langsung, tetapi terdapat kesamaan tren konsentrasi seiring waktu antara hasil pemodelan dan data pengukuran langsung. Wang *et al.* (2018) memperoleh hasil model paling baik dengan rasio perbedaan sebesar 1,9-12,5%. Perbedaan konsentrasi PM hasil pengukuran langsung dengan hasil pemodelan dalam penelitian ini dapat dilihat pada grafik yang ditunjukkan oleh Gambar 8 – 11.



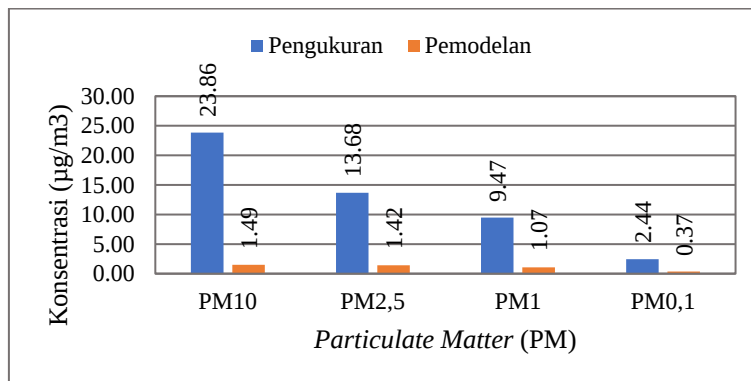
Gambar 8. Perbandingan Konsentrasi PM untuk Pengukuran 1 di Titik Sampling GS



Gambar 9. Perbandingan Konsentrasi PM untuk Pengukuran 1 di Titik Sampling HS



Gambar 10. Perbandingan Konsentrasi PM untuk Pengukuran 2 di Titik *Sampling* GS



Gambar 11. Perbandingan Konsentrasi PM untuk Pengukuran 2 di Titik *Sampling* HS

Terdapat perbedaan yang sangat signifikan antara konsentrasi PM yang diukur secara langsung dan konsentrasi PM dari hasil pemodelan. Konsentrasi PM untuk titik *sampling* GS hasil pemodelan lebih tinggi dibandingkan dengan hasil pengukuran langsung, sedangkan untuk titik *sampling* HS konsentrasi hasil pengukuran langsung justru jauh lebih tinggi. Rasio perbedaan konsentrasi PM untuk titik *sampling* GS pada pengukuran 1 dalam rentang 11,67 – 103,90 % dan pengukuran 2 dalam rentang 41,62 – 223,45 %. Rasio perbedaan untuk konsentrasi PM untuk titik *sampling* HS pada pengukuran 1 dalam rentang 93,65 – 97,55% sedangkan untuk pengukuran 2 dalam rentang 84,84 – 93,76 %. Adapun persentase RMSPE untuk PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁, dan PM_{0,1} secara berturut – turut adalah 67,52 % ; 82,01 % ; 70,81 % ; dan 133,96 %. Nilai – nilai RMSPE tersebut jauh lebih besar dari 30% sehingga disimpulkan bahwa hasil pemodelan dinilai buruk berdasarkan kategorisasi oleh Despotovic (2016).

Menurut Chaisri & Ponpesh, (2022) model CFD merupakan model yang sangat baik digunakan dalam pemodelan skala mikro dengan geometri yang kompleks seperti di wilayah perkotaan namun, pengaturan dan *input* pemodelan yang juga kompleks terkadang membuat validasi dengan hasil pengukuran menjadi lebih sulit. Keakuratan hasil model CFD dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti penyederhanaan dan asumsi yang dibuat dalam model, keakuratan perhitungan beban emisi, konfigurasi geometri, kondisi atmosfer yang digunakan sebagai masukan, kompleksitas model, serta tingkat validasi dan verifikasi yang dilakukan (Lauriks *et al.*, 2021; Wadlow *et al.*, 2019).

Kondisi meteorologi terutama kecepatan dan arah angin merupakan faktor paling signifikan yang mempengaruhi hasil pemodelan dalam beberapa publikasi (Chaisri & Ponpesh, 2022; Wang *et al.*, 2018) (Chaisri & Ponpesh, 2022; Nikolova *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2018). Nikolova *et al.* (2011) memodelkan sebaran PM_{0,1} di area perkotaan dan menemukan bahwa hasil pemodelan menunjukkan konsentrasi yang lebih tinggi daripada pengukuran langsung di area dekat jalan tetapi, konsentrasi tersebut jauh lebih

rendah dibandingkan dengan hasil pengukuran langsung di area yang terisolasi oleh bangunan. Penelitian ini juga menemukan bahwa arah angin memainkan peranan penting dalam menentukan hasil model, dan faktor ini menjadi penyebab ketidakakuratan dalam hasil yang diperoleh. Data meteorologi yang digunakan, yang berasal dari skala regional, tidak cukup untuk menggambarkan variabilitas medan angin di perkotaan.

Seperti halnya hasil penelitian oleh Nikolova *et al.* (2011), data meteorologi yang digunakan dalam penelitian ini yang berasal dari data pemodelan oleh ECMWF juga tidak cukup dapat menggambarkan variabilitas medan angin perkotaan, sehingga menghasilkan akurasi model yang kurang baik, meskipun resolusi meteorologi ECMWF termasuk cukup baik (Darmadi, 2021). Oleh karena itu, penting menggunakan data meteorologi terutama arah angin yang benar – benar dapat menggambarkan kondisi area studi yang sebenarnya, seperti halnya dalam penelitian Wang *et al.* (2018) yang memperoleh hasil pemodelan yang cukup baik karena menggunakan data meteorologi skala lokal yang diukur oleh stasiun meteorologi untuk data suhu, kelembaban dan kecepatan angin sedangkan arah angin diukur secara langsung di titik – titik *sampling*.

Konfigurasi geometri juga tidak kalah pentingnya dalam menentukan akurasi model (Lauriks *et al.*, 2021). Penelitian ini menyederhanakan bentuk geometri dengan tidak mendefinisikan pintu, jendela, dan ventilasi pada bangunan sekolah serta kehadiran dinding pembatas di sekeliling area sekolah namun, justru aliran udara yang berasal dari pintu, jendela, dan ventilasi bangunan menjadi faktor penting dalam menentukan konsentrasi pada area yang terisolasi seperti titik *sampling* HS. Penyederhanaan geometri ini dilakukan karena semakin *detail* bentuk geometri, maka akan semakin halus *meshing*/diskritasi yang diperlukan, maka akan semakin besar pula daya komputasi yang diperlukan dalam melakukan pemodelan. Pada beberapa kasus konfigurasi geometri yang disederhanakan akan tetap dapat menghasilkan hasil model yang baik, asalkan kondisi atmosfer yang digunakan sebagai *input* pemodelan baik (Ramakrishna, 2011) namun, dalam kasus lainnya geometri justru menjadi faktor yang menyebabkan ketidakakuratan hasil model (Garcia *et al.*, 2013).

4. KESIMPULAN

Rata rata konsentrasi PM₁₀ hasil pengukuran langsung di SMPN 1 Kota Jambi adalah 20,66 µg/m³, konsentrasi rata – rata PM_{2,5} adalah 11,79 µg/m³, rata – rata konsentrasi PM₁ adalah 8,74 µg/m³, dan rata – rata konsentrasi PM_{0,1} adalah 1,96 µg/m³. Konsentrasi rata-rata PM di titik *sampling* halaman sekolah lebih tinggi daripada di titik *sampling* gerbang sekolah. Hal ini disebabkan oleh faktor aliran udara, di mana semakin buruk aliran udara, semakin besar kemungkinan terjadinya penumpukan PM di suatu lokasi karena sulit dibersihkan oleh angin, seperti yang terjadi di titik *sampling* halaman sekolah.

Terdapat perbedaan yang signifikan antara konsentrasi PM hasil pengukuran langsung dan hasil pemodelan CFD. Rasio perbedaan untuk PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁, dan PM_{0,1} secara berturut – turut dalam rentang 11,67 – 97,55 %; 45,35 – 95,96 %; 32,19 – 95,24 %; dan 84,84 – 233,45%. Hasil validasi menunjukkan persentase RMSPE >30%, yaitu 67,52 % untuk persentase rata – rata PM₁₀, 82,01 % untuk persentase rata - rata PM_{2,5}, 70,81% untuk persentase rata - rata PM₁, dan 133,96 % untuk persentase rata - rata PM_{0,1}. Persentase RMSPE yang >30% menandakan hasil pemodelan tidak valid atau tidak sesuai dengan hasil pengukuran langsung. Faktor yang mempengaruhi ketidakakuratan hasil pemodelan tersebut adalah data meteorologi yang digunakan mempunyai resolusi yang terlalu kasar untuk dapat menggambarkan variabilitas medan angin perkotaan serta kekurangan dalam pendefinisian geometri model.

5. REFERENCES

- Amalia, A., & Marshita, F. B. (2021). Pengaruh Faktor Meteorologis Terhadap Perubahan Konsentrasi PM10 Periode Sebelum dan Saat PSBB di Kota Surabaya dan Sekitarnya. *Buletin GAW Bariri (BGB)*, 2(1), 24–36. <https://doi.org/10.31172/bgb.v2i1.42>
- Chaisri, P., & Ponpesh, P. (2022). Prediction of PM2.5 Dispersion in Bangkok Pathumwan District) Using CFD Modeling. *Engineering Journal*, 26(6), 1–13. <https://doi.org/10.4186/ej.2022.26.6.1>
- Darmadi, D. (2021). Kajian Hasil Prediksi Konsentrasi Aerosol PM10 Dari Data ECMWF Dengan Hasil Pengukuran Di Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang (Agam) dan Kota Padang. *Megasains*, 12(1), 26–33. <https://doi.org/10.46824/megasains.v12i1.59>
- Environment Protection Authority. (2021). *Ambient Air Monitoring Guidance Note*. NSW Environment Protection Authority. <https://www.epa.nsw.gov.au/>
- Environmental Protection Agency. (2022). *Air Quality Models*. Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling (SCRAM). <https://www.epa.gov/scram/air-quality-models#:~:text=Air quality models use mathematical,and react in the atmosphere.>
- Garcia, J., Cerdeira, R., Tavares, N., Coelho, L. M. R., Kumar, P., & Carvalho, M. G. (2013). Influence of Virtual Changes in Building Configurations of a Real Street Canyon on the Dispersion of PM10. *Urban Climate*, 5, 68–81. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.08.002>
- Gauderman, W. J., Avol, E., Gilliland, F., Vora, H., Thomas, D., Berhane, K., McConnell, R., Kuenzli, N., Lurmann, F., Rappaport, E., Margolis, H., Bates, D., & Peters, J. (2004). The Effect of Air Pollution on Lung Development from 10 to 18 Years of Age. *The New England Journal of Medicine*, 352(11), 687–696. <https://www.nejm.org/doi/full/10.1056/nejmoa040610>
- Kementerian Lingkungan Hidup. (2013). Pedoman Teknis Penyusunan Inventarisasi Emisi Pencemar Udara di Perkotaan. In *Pedoman Teknis Penyusunan Inventarisasi Emisi Pencemar Udara di Perkotaan*. Kementerian Lingkungan Hidup.
- Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan T. (2021). *Jumlah Siswa Menurut Umur/Kelompok Umur Tiap Provinsi*. Statistik Pendidikan.
- Kumaat, M. (2004). Transportasi dan Polusi pada Kawasan Pendidikan. *Tekno-Sipil*, 10(57), 27–32.
- Lara, I. R. (2015). *Air Quality in Schools and Children's Exposure to Particulate Pollution in Barcelona*. Universitat Autònoma de Barcelona.
- Lauriks, T., Longo, R., Baetens, D., Derudi, M., Parente, A., Bellemans, A., van Beeck, J., & Denys, S. (2021). Application of Improved CFD Modeling for Prediction and Mitigation of Traffic-Related Air Pollution Hotspots in a Realistic Urban Street. *Atmospheric Environment*, 246, 1–30. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118127>
- Nikolova, I., Janssen, S., Vos, P., Vrancken, K., Mishra, V., & Berghmans, P. (2011). Dispersion Modelling of Traffic Induced Ultrafine Particles in a Street Canyon in Antwerp, Belgium and Comparison with Observations. *Science of the Total Environment*, 412–413, 336–343. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.09.081>
- Ntziachristos, L., & Boulter, P. (2019). *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019*. European Environment Agency.
- Pospisil, J., Huzlik, J., Licbinsky, R., & Spilacek, M. (2020). Dispersion Characteristics of PM10 Particles Identified by Numerical Simulation in the Vicinity of Roads Passing Through Various Types of Urban Areas. *Atmosphere*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/ATMOS11050454>
- Ramakrishna, M. (2011). Elements of Computational Fluid Dynamics. In *A Golden Jubilee*.
- Slezakova, K., Morais, S., & Carmo Pereir, M. do. (2013). Atmospheric Nanoparticles and Their Impacts on Public Health. In *Current Topics in Public Health* (pp. 503–529).
- Tiwary, A., Williams, I., & Colls, J. (2019). *Air Pollution : Measurement, Modelling and Mitigation* (Fourth Edi). CRC Press.

- Wadlow, I., Paton-Walsh, C., Forehead, H., Perez, P., Amirghasemi, M., Guérette, élise A., Gendek, O., & Kumar, P. (2019). Understanding Spatial Variability of Air Quality in Sydney: Part 2-a Roadside Case Study. *Atmosphere*, 10(4), 1–23. <https://doi.org/10.3390/ATMOS10040217>
- Wang, Y., Zhou, Y., Zuo, J., & Rameezdeen, R. (2018). A Computational Fluid Dynamic (CFD) Simulation of PM10 Dispersion Caused by Rail Transit Construction Activity: A Real Urban Street Canyon Model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(3), 1–30. <https://doi.org/10.3390/ijerph15030482>
- Zhang, Q., & Zhu, Y. (2012). Characterizing ultrafine particles and other air pollutants at five schools in South Texas. *Indoor Air*, 22(1), 33–42. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2011.00738.x>