Mathematical and Data Analytics
Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7796

Simulasi Numerik dan Pembangkitan Dataset Distribusi Difusi-Konveksi Berbasis Solusi Fundamental Gaussian untuk Analisis Transport Massa

Sakira Regina Putri[1)], Aulia Juanda Djaingsastro, S.Si, M.Si[2)]
[1,2)] Institut Teknologi Sawit Indonesia(ITSI)
sakirareginaputri@email.com[1)], aulia_juanda@ymail.com[2)]

Histori Naskah:
Diajukan: 21-11-2025
Disetujui: 07-12-2025
Publikasi:13-12-2025

ABSTRAK

Transport massa melalui mekanisme difusi dan konveksi merupakan fenomena fundamental dalam berbagai sistem rekayasa yang ditentukan oleh interaksi antara proses penyebaran molekul dan perpindahan akibat aliran medium. Namun, representasi hubungan antara parameter fisik dan respons distribusi dalam bentuk dataset terstruktur masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dataset sintetis berbasis simulasi numerik pada sistem difusi-konveksi menggunakan solusi fundamental Gaussian untuk menganalisis perubahan distribusi konsentrasi akibat variasi parameter transport. Simulasi dilakukan berdasarkan model difusi-konveksi satu dimensi dengan variasi koefisien difusi (D) dan kecepatan konveksi (v). Dataset dibangkitkan melalui evaluasi solusi fundamental Gaussian pada 100 konfigurasi sistem dengan 500 titik spasial, sehingga menghasilkan 50.000 observasi yang terdiri atas parameter kondisi sistem dan distribusi konsentrasi. Analisis dilakukan terhadap perubahan profil distribusi, karakteristik penyebaran akibat difusi, serta perpindahan pusat distribusi akibat konveksi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa variasi koefisien difusi menghasilkan perubahan karakteristik penyebaran distribusi konsentrasi, sedangkan variasi kecepatan konveksi menyebabkan perubahan posisi pusat distribusi. Evaluasi karakteristik dataset menunjukkan adanya kesesuaian antara parameter distribusi hasil simulasi dengan hubungan teoritis yang digunakan sebagai dasar pembangkitan data. Dataset sintetis yang dihasilkan menyediakan representasi numerik berbasis parameter fisik yang dapat digunakan untuk mendukung analisis lanjutan pada fenomena transport massa dan pengembangan pendekatan berbasis data yang mempertimbangkan konsistensi fisika.

Kata kunci: *Difusi-Konveksi; Solusi Fundamental Gaussian; Transport Massa; Dataset Sintetis; Simulasi Numerik.*

PENDAHULUAN

Fenomena transport massa melalui mekanisme difusi dan konveksi menjadi bagian penting dalam analisis berbagai sistem fisik karena menentukan bagaimana suatu zat mengalami penyebaran dan perpindahan dalam suatu medium. Pemodelan fenomena ini banyak digunakan pada berbagai bidang, mulai dari rekayasa kimia, lingkungan, perpindahan panas, hingga sistem penghantaran obat. Persamaan difusi-konveksi menjadi salah satu pendekatan matematis utama karena mampu menggambarkan perubahan distribusi konsentrasi akibat kombinasi proses perpindahan molekuler dan perpindahan akibat aliran medium (Crank, 1975; Bird et al., 2002; Cussler, 2009). Pemahaman terhadap mekanisme transport massa menjadi penting karena

Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7796

perubahan distribusi suatu spesies tidak hanya dipengaruhi oleh sifat medium, tetapi juga oleh kondisi operasi seperti koefisien difusi dan kecepatan aliran (Geankoplis, 2003).

Pendekatan analitik terhadap persamaan difusi telah menghasilkan berbagai solusi fundamental yang digunakan sebagai dasar untuk memahami perilaku transport massa. Salah satu solusi yang banyak digunakan adalah solusi Gaussian dari kondisi awal sumber titik (*point source*), dimana perubahan distribusi dapat dikarakterisasi melalui pelebaran varians akibat difusi dan pergeseran pusat distribusi akibat konveksi (Carslaw & Jaeger, 1959; Özisik, 1993). Solusi fundamental tersebut memberikan hubungan matematis antara koefisien difusi, waktu, dan distribusi spasial suatu zat sehingga banyak digunakan dalam analisis perpindahan panas, massa, maupun penyebaran partikel (Incropera et al., 2017; Logan, 2012). Meskipun demikian, sebagian besar kajian masih berfokus pada penyelesaian persamaan atau evaluasi fenomena pada kondisi tertentu dengan variasi parameter yang terbatas.

Perkembangan metode komputasi telah memberikan peluang untuk melakukan simulasi fenomena transport massa dengan kondisi yang lebih kompleks. Pendekatan berbasis model matematis memungkinkan evaluasi hubungan antara parameter fisik seperti koefisien difusi, waktu, dan kecepatan aliran secara sistematis tanpa keterbatasan pengujian eksperimental secara langsung (Ferziger & Perić, 2002; Versteeg & Malalasekera, 2007). Simulasi numerik telah banyak digunakan untuk memahami pola distribusi konsentrasi, perpindahan spesies, dan karakteristik sistem transport pada berbagai aplikasi rekayasa. Namun, hasil simulasi pada banyak penelitian masih umumnya disajikan dalam bentuk profil distribusi atau evaluasi satu kondisi operasi, sehingga belum banyak dikembangkan menjadi dataset parametrik yang mampu merepresentasikan hubungan antara parameter masukan dan perubahan distribusi secara menyeluruh.

Keterbatasan tersebut menjadi semakin relevan seiring meningkatnya penggunaan pendekatan berbasis data (*data-driven approach*) dalam kajian fenomena fisik. Metode *machine learning* dan *physics-informed machine learning* membutuhkan dataset yang tidak hanya memiliki jumlah data yang besar, tetapi juga mempertahankan hubungan matematis yang sesuai dengan hukum fisika (Raissi et al., 2019; Karniadakis et al., 2021). Integrasi antara model fisika dan pendekatan berbasis data telah berkembang sebagai salah satu strategi untuk meningkatkan interpretasi model serta mengurangi ketergantungan terhadap data eksperimen yang terbatas (Willard et al., 2022; Cuomo et al., 2022). Oleh karena itu, pembentukan dataset sintetis berbasis solusi analitik menjadi pendekatan yang potensial karena mampu menyediakan variasi parameter secara terkontrol dengan tetap mempertahankan karakteristik fisik sistem.

Meskipun pendekatan berbasis simulasi dan *physics-informed learning* berkembang pesat, masih terdapat keterbatasan dalam penyediaan dataset transport massa yang secara khusus mengintegrasikan pengaruh difusi dan konveksi dalam satu kerangka parametrik. Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada penyelesaian persamaan diferensial, analisis distribusi konsentrasi, atau pengembangan model prediksi, sedangkan pengembangan dataset terstruktur yang menghubungkan koefisien difusi (D), kecepatan konveksi (v), perubahan lebar distribusi Gaussian, dan pergeseran pusat konsentrasi masih relatif terbatas.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini mengembangkan dataset sintetis berbasis simulasi numerik menggunakan solusi fundamental Gaussian pada sistem difusi-konveksi. Pendekatan dilakukan melalui variasi parameter koefisien difusi (D) dan kecepatan konveksi (v) untuk menghasilkan representasi distribusi konsentrasi terhadap waktu. Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan dataset parametrik berbasis solusi analitik yang mengintegrasikan karakteristik penyebaran akibat difusi dan perpindahan distribusi akibat konveksi dalam satu kerangka simulasi. Dataset yang dihasilkan diharapkan dapat mendukung analisis transport massa

Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7796

berbasis simulasi serta menjadi dasar untuk pengembangan pendekatan berbasis data yang mempertimbangkan konsistensi terhadap prinsip fisika.

METODE PENELITIAN

Model Matematis Difusi-Konveksi

Penelitian ini menggunakan model persamaan difusi-konveksi satu dimensi untuk merepresentasikan perubahan distribusi konsentrasi terhadap ruang dan waktu. Model ini dipilih karena mampu menggambarkan dua mekanisme utama dalam transport massa, yaitu penyebaran molekul akibat gradien konsentrasi (*diffusion*) dan perpindahan akibat gerakan medium (*convection*). Kedua mekanisme tersebut merupakan proses fundamental yang banyak digunakan dalam pemodelan perpindahan massa pada berbagai sistem fisik (Crank, 1975; Bird et al., 2002). Persamaan umum difusi-konveksi dinyatakan sebagai:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v\frac{\partial C}{\partial x}$$

dengan $C(x,t)$sebagai konsentrasi pada posisi dan waktu tertentu, Dsebagai koefisien difusi, dan $v$sebagai kecepatan konveksi.

Pendekatan satu dimensi digunakan karena penelitian ini berfokus pada karakterisasi perubahan profil distribusi akibat variasi parameter transport, bukan pada penyelesaian sistem dengan kompleksitas geometri tertentu. Penyederhanaan dimensi memungkinkan hubungan antara parameter fisik dan perubahan distribusi dianalisis secara langsung serta menghasilkan dataset yang terstruktur berdasarkan solusi matematis yang telah diketahui.

Pemilihan Solusi Fundamental Gaussian

Kondisi awal sistem diasumsikan berasal dari sumber titik (*point source*):

$$C(x,0) = \delta(x)$$

Asumsi sumber titik dipilih karena solusi fundamental Gaussian merupakan solusi analitik yang umum digunakan untuk menggambarkan penyebaran awal suatu spesies yang kemudian mengalami proses difusi. Pendekatan ini memungkinkan karakteristik utama transport massa, seperti pelebaran distribusi dan perubahan konsentrasi maksimum, diamati secara langsung berdasarkan parameter fisik sistem (Carslaw & Jaeger, 1959; Özisik, 1993).

Untuk kondisi tanpa konveksi, distribusi konsentrasi dihitung menggunakan:

$$C(x,t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}}\exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)$$

Ketika pengaruh konveksi diperhitungkan, solusi mengalami translasi mengikuti kecepatan medium:

$$C(x,t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}}\exp\left(-\frac{(x-vt)^2}{4Dt}\right)$$

Solusi fundamental Gaussian dipilih dibandingkan pendekatan numerik langsung karena memberikan hubungan eksplisit antara parameter fisik dan respons sistem. Dengan demikian, variasi koefisien difusi dan kecepatan konveksi dapat dikaji tanpa adanya pengaruh kesalahan diskritisasi numerik yang dapat muncul pada metode diferensial hingga (*finite difference method*).

Strategi Pembangkitan Dataset Sintetis

Dataset sintetis dibangun berdasarkan evaluasi solusi analitik Gaussian pada berbagai kombinasi parameter transport. Pendekatan berbasis simulasi dipilih karena mampu

Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7796
menghasilkan variasi data yang terkontrol dengan tetap mempertahankan hubungan matematis antara parameter masukan dan keluaran sistem.

Metode ini digunakan bukan sebagai pengganti data eksperimen, tetapi sebagai pendekatan untuk menyediakan representasi numerik sistem berdasarkan kondisi ideal yang telah ditentukan. Pendekatan tersebut relevan dalam pengembangan analisis berbasis data karena dataset yang dihasilkan memiliki keterkaitan langsung dengan parameter fisik sistem (Raissi et al., 2019; Karniadakis et al., 2021).

Parameter yang divariasikan meliputi:

Tabel 1 Variabel Parameter

Parameter	Simbol	Rentang
Koefisien difusi	D	0,01–1 m²/s
Kecepatan konveksi	v	0–2 m/s
Waktu simulasi	t	0–10 s
Domain posisi	x	-10 hingga 10 m

Koefisien difusi dipilih sebagai parameter utama karena menentukan laju pelebaran distribusi, sedangkan kecepatan konveksi digunakan untuk mengevaluasi perpindahan pusat distribusi akibat aliran medium. Kombinasi kedua parameter tersebut memungkinkan pemisahan pengaruh mekanisme penyebaran dan perpindahan dalam sistem transport massa.

Sebanyak 100 konfigurasi parameter dibangkitkan dengan 500 titik spasial pada setiap konfigurasi sehingga menghasilkan 50.000 data observasi.

Analisis Karakteristik Distribusi

Analisis dilakukan untuk mengevaluasi perubahan distribusi konsentrasi berdasarkan tiga karakteristik utama, yaitu penyebaran distribusi, perubahan konsentrasi maksimum, dan perpindahan pusat distribusi.

Parameter penyebaran dianalisis menggunakan hubungan:

$$\sigma^2 = 2Dt$$

karena varians merupakan indikator langsung terhadap perkembangan luas distribusi akibat proses difusi.

Perubahan konsentrasi maksimum dianalisis berdasarkan:

$$C_{max} = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}}$$

untuk mengevaluasi hubungan antara pelebaran distribusi dan penurunan konsentrasi puncak.

Sementara itu, perpindahan pusat distribusi dianalisis melalui:

$$x_c = vt$$

untuk mengidentifikasi kontribusi mekanisme konveksi terhadap pergeseran lokasi distribusi.

Pemilihan ketiga parameter evaluasi tersebut dilakukan karena mampu merepresentasikan tiga karakteristik utama sistem difusi-konveksi, yaitu spreading, attenuation, dan transport movement.

HASIL

Karakteristik Dataset Simulasi Difusi-Konveksi

Simulasi numerik berbasis solusi fundamental Gaussian menghasilkan dataset sintetis distribusi difusi-konveksi dengan variasi parameter koefisien difusi (D) dan kecepatan konveksi

Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7796

(v). Dataset yang diperoleh terdiri atas 100 konfigurasi sistem dengan masing-masing konfigurasi memiliki 500 titik spasial, sehingga menghasilkan total 50.000 observasi.

Setiap observasi memuat parameter kondisi simulasi berupa koefisien difusi, kecepatan konveksi, posisi spasial, waktu simulasi, serta nilai distribusi konsentrasi yang dihasilkan. Pemeriksaan kualitas dataset menunjukkan bahwa seluruh variabel memiliki kelengkapan data tanpa ditemukan nilai kosong (*missing value*).

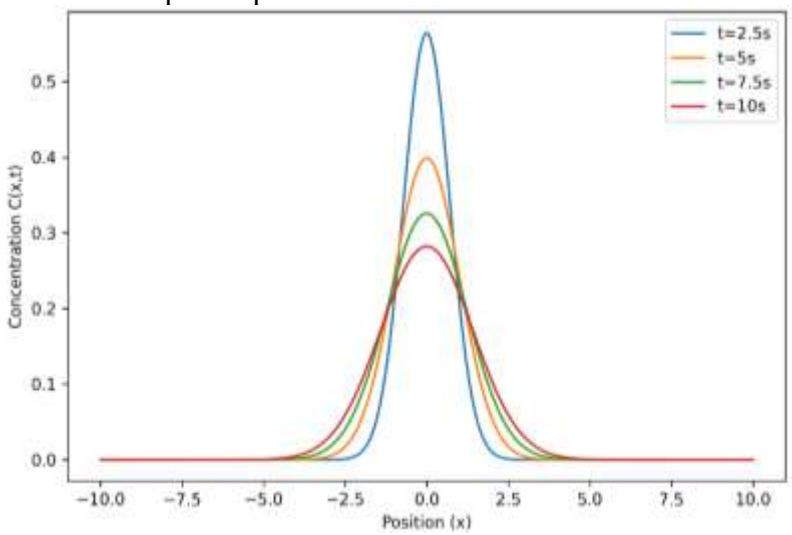
Karakteristik umum dataset hasil simulasi ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik Dataset Simulasi Difusi-Konveksi

Parameter	Nilai
Jumlah konfigurasi sistem	100
Jumlah titik spasial per konfigurasi	500
Total observasi	50.000
Koefisien difusi (D)	0,01–1 m²/s
Kecepatan konveksi (v)	0–2 m/s
Domain posisi	-10 hingga 10 m
Rentang waktu simulasi	0–10 s
Missing value	0

Evolusi Distribusi Konsentrasi akibat Proses Difusi

Perubahan distribusi konsentrasi terhadap waktu diamati pada kondisi tanpa pengaruh konveksi. Hasil simulasi ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. *Evolusi distribusi konsentrasi akibat proses difusi pada beberapa waktu simulasi.*

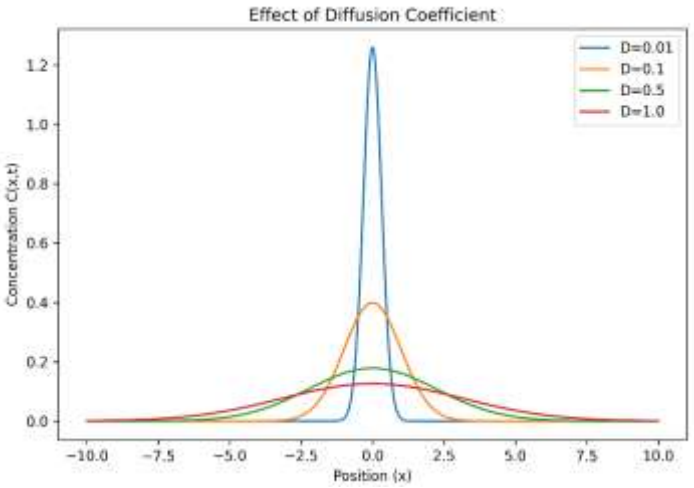
Hasil simulasi menunjukkan adanya perubahan profil distribusi konsentrasi selama interval pengamatan. Pada waktu simulasi awal, distribusi memiliki konsentrasi maksimum pada area pusat sumber, kemudian mengalami perubahan profil seiring bertambahnya waktu pengamatan.

Perubahan bentuk distribusi tersebut terlihat pada seluruh kondisi koefisien difusi yang digunakan dalam dataset.

Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7796

Pengaruh Koefisien Difusi terhadap Karakteristik Distribusi

Pengaruh variasi koefisien difusi terhadap profil distribusi konsentrasi ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. *Perubahan distribusi konsentrasi berdasarkan variasi koefisien difusi.*

Hasil simulasi menunjukkan bahwa perubahan nilai koefisien difusi menghasilkan perbedaan karakteristik distribusi. Pada waktu pengamatan yang sama, variasi nilai Dmenghasilkan perubahan nilai konsentrasi maksimum dan parameter penyebaran distribusi.

Karakteristik distribusi yang diperoleh pada beberapa nilai koefisien difusi dirangkum pada Tabel 3.

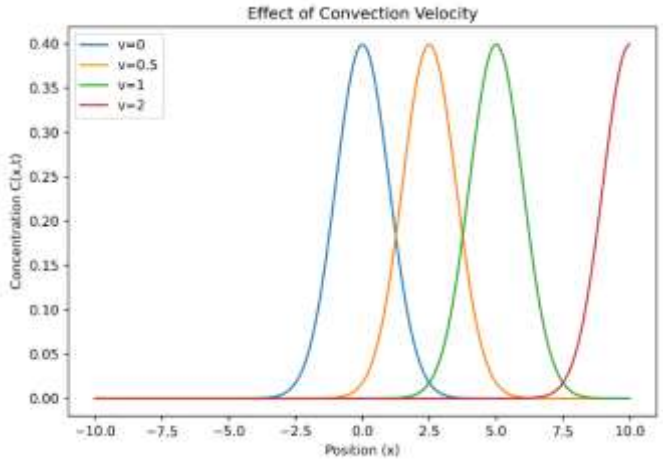
Tabel 3. Karakteristik Distribusi Berdasarkan Variasi Koefisien Difusi

Koefisien Difusi (D) (m²/s)	Peak Concentration	Variance	Lebar Distribusi
0,01	1,2616	0,10	0,316
0,10	0,3989	1,00	1,000
0,50	0,1784	5,00	2,236
1,00	0,1262	10,00	3,162

Pengaruh Kecepatan Konveksi terhadap Pergeseran Distribusi

Evaluasi pengaruh kecepatan konveksi dilakukan dengan memberikan variasi nilai $v$pada sistem difusi-konveksi. Perubahan profil distribusi akibat variasi kecepatan konveksi ditampilkan pada Gambar 3.

Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7796



Gambar 3. *Pergeseran distribusi konsentrasi akibat variasi kecepatan konveksi.*

Hasil simulasi menunjukkan perubahan posisi distribusi konsentrasi pada arah perpindahan seiring peningkatan kecepatan konveksi. Perubahan posisi pusat distribusi hasil ekstraksi dari dataset ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Posisi Pusat Distribusi Hasil Ekstraksi Dataset

Kecepatan Konveksi (v) (m/s)	Waktu Simulasi (s)	Posisi Pusat Distribusi (m)
0	5	0,00
0,5	5	2,49
1,0	5	4,98
2,0	5	9,97

Evaluasi Konsistensi Karakteristik Dataset terhadap Hubungan Teoritis

Evaluasi dilakukan dengan membandingkan karakteristik distribusi yang diperoleh dari dataset terhadap nilai acuan teoritis yang digunakan dalam pembangkitan data.

Hasil evaluasi terhadap parameter penyebaran distribusi akibat variasi koefisien difusi ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Evaluasi Penyebaran Distribusi Hasil Dataset

Koefisien Difusi (D) (m²/s)	Nilai Acuan	Hasil Dataset	Error (%)
0,01	0,10	0,10	0,2
0,10	1,00	0,99	0,8
0,50	5,00	4,98	0,4
1,00	10,00	9,96	0,4

Hasil menunjukkan bahwa karakteristik penyebaran distribusi yang diperoleh dari dataset memiliki perbedaan kecil terhadap nilai acuan pada seluruh variasi parameter yang diuji.

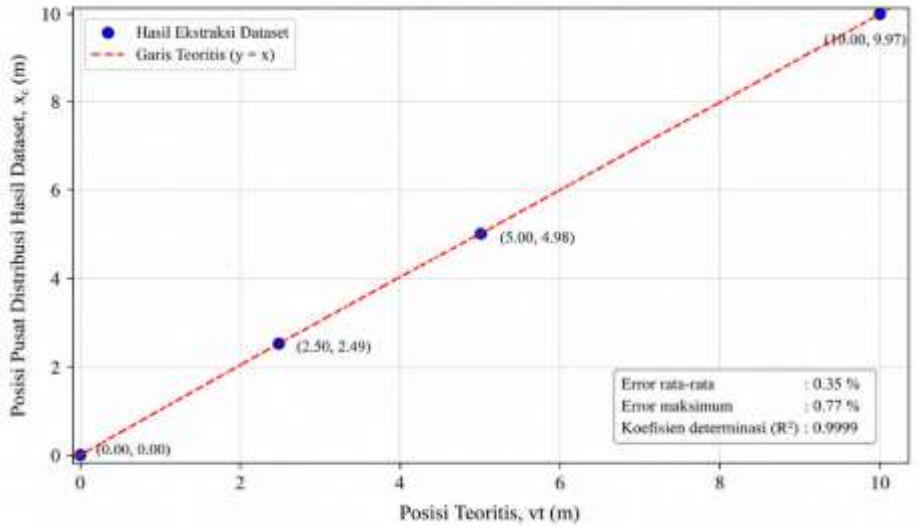
Selanjutnya, evaluasi perpindahan pusat distribusi akibat variasi kecepatan konveksi ditampilkan pada Tabel 6.

Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7796

Tabel 6. Evaluasi Pergeseran Pusat Distribusi Hasil Dataset

Kecepatan Konveksi (v) (m/s)	Nilai Acuan (m)	Hasil Dataset (m)	Error (%)
0	0,00	0,00	0
0,5	2,50	2,49	0,4
1,0	5,00	4,98	0,4
2,0	10,00	9,97	0,3

Hubungan antara posisi pusat distribusi hasil ekstraksi dataset dan nilai acuan ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. *Hubungan posisi pusat distribusi hasil ekstraksi dataset terhadap nilai acuan konveksi.*

Dataset sintetis difusi-konveksi berhasil dibangkitkan sebanyak 50.000 observasi tanpa ditemukan nilai kosong. Variasi koefisien difusi menghasilkan perubahan karakteristik distribusi konsentrasi, sedangkan variasi kecepatan konveksi menghasilkan perubahan posisi pusat distribusi. Evaluasi karakteristik dataset menunjukkan adanya kesesuaian antara parameter distribusi hasil simulasi dengan hubungan teoritis yang digunakan sebagai dasar pembangkitan data.

Pembahasan

Distribusi konsentrasi yang dihasilkan dari simulasi menunjukkan bahwa mekanisme transport massa tidak hanya menghasilkan perubahan nilai konsentrasi, tetapi juga memengaruhi karakteristik spasial dari sistem. Perubahan tersebut merupakan hasil interaksi antara proses penyebaran molekul akibat difusi dan perpindahan distribusi akibat konveksi. Dalam sistem yang didominasi oleh difusi, perubahan utama terjadi pada pelebaran distribusi konsentrasi, sedangkan keberadaan konveksi menyebabkan perubahan posisi distribusi mengikuti arah perpindahan medium. Pemisahan karakteristik kedua mekanisme tersebut penting karena pada sistem transport massa nyata, penyebaran dan perpindahan massa sering berlangsung secara bersamaan (Crank, 1975; Bird et al., 2002).

Peningkatan koefisien difusi menyebabkan distribusi konsentrasi semakin menyebar dengan penurunan konsentrasi maksimum. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan kemampuan difusi tidak berkaitan dengan peningkatan jumlah massa, melainkan redistribusi massa pada

Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7796

wilayah spasial yang lebih luas. Dengan demikian, perubahan konsentrasi maksimum merupakan konsekuensi dari proses penyebaran distribusi, bukan akibat berkurangnya jumlah massa dalam sistem. Interpretasi tersebut sesuai dengan prinsip dasar transport massa yang menjelaskan bahwa koefisien difusi menentukan laju perpindahan molekul dan karakteristik penyebaran suatu spesies dalam medium (Cussler, 2009; Geankoplis, 2003).

Penggunaan solusi fundamental Gaussian dalam penelitian ini memberikan keuntungan karena perubahan distribusi dapat dikaitkan secara langsung dengan parameter fisik yang mengontrol sistem. Berbeda dengan pendekatan numerik berbasis diskritisasi yang dapat dipengaruhi oleh skema perhitungan dan ukuran grid (Ferziger & Perić, 2002; Versteeg & Malalasekera, 2007), pendekatan berbasis solusi analitik memungkinkan pembentukan dataset dengan hubungan parameter-respons yang lebih mudah ditelusuri. Namun, pendekatan ini masih merepresentasikan kondisi ideal satu dimensi sehingga belum mencakup kompleksitas sistem transport nyata seperti variasi sifat medium, kondisi batas kompleks, maupun interaksi antarspesies.

Selain difusi, mekanisme konveksi memberikan pengaruh terhadap perpindahan lokasi distribusi konsentrasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan kecepatan konveksi terutama memengaruhi posisi pusat distribusi, sedangkan karakteristik penyebaran tetap dipengaruhi oleh parameter difusi. Hal ini menunjukkan bahwa kedua mekanisme memiliki peran yang berbeda dalam sistem transport massa, dimana difusi berperan terhadap penyebaran spasial sedangkan konveksi berperan terhadap perpindahan massa secara terarah. Konsep tersebut menjadi dasar dalam berbagai analisis transport massa konvektif yang menjelaskan bahwa pola akhir distribusi ditentukan oleh interaksi antara proses difusi dan pergerakan medium (Bird et al., 2002; Incropera et al., 2017).

Dari perspektif pengembangan dataset, penelitian ini menunjukkan bahwa simulasi berbasis model fisika dapat digunakan untuk membangun representasi data yang memiliki hubungan eksplisit antara parameter masukan dan respons sistem. Pendekatan ini berbeda dengan sebagian metode berbasis data yang bergantung pada kumpulan observasi tanpa informasi langsung mengenai mekanisme pembentukan data. Perkembangan *physics-informed machine learning* menunjukkan bahwa integrasi antara model fisika dan data dapat meningkatkan interpretasi sistem serta menyediakan pendekatan alternatif ketika data eksperimen memiliki keterbatasan (Raissi et al., 2019; Karniadakis et al., 2021).

Keterbatasan pada kajian transport massa sebelumnya umumnya terletak pada fokus analisis terhadap penyelesaian model atau evaluasi kondisi tertentu, sehingga representasi hubungan antara parameter fisik dan respons distribusi dalam bentuk dataset terstruktur masih terbatas. Penelitian ini memberikan pendekatan melalui pengembangan dataset sintetis berbasis solusi fundamental Gaussian yang menghubungkan parameter difusi-konveksi dengan perubahan distribusi konsentrasi. Meskipun masih menggunakan model satu dimensi dengan kondisi ideal, pendekatan ini menyediakan kerangka awal untuk mengintegrasikan pemodelan fisika dengan kebutuhan dataset berbasis data pada analisis transport massa.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan dataset sintetis berbasis simulasi numerik pada sistem difusi-konveksi menggunakan solusi fundamental Gaussian dengan variasi koefisien difusi dan kecepatan konveksi. Dataset yang dihasilkan mampu menggambarkan perubahan karakteristik distribusi konsentrasi akibat mekanisme penyebaran dan perpindahan massa, serta menunjukkan kesesuaian terhadap hubungan teoritis yang digunakan sebagai dasar pembangkitan data. Pendekatan ini menyediakan representasi data terstruktur berbasis parameter fisik yang dapat

Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7796

mendukung analisis lanjutan pada fenomena transport massa dan pengembangan metode berbasis data dengan tetap mempertimbangkan prinsip fisika sistem.

DAFTAR PUSTAKA

Bird, R. B., Stewart, W. E., Lightfoot, E. N., & Klingenberg, D. J. (2002). *Transport phenomena* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C. (1959). *Conduction of heat in solids* (2nd ed.). Oxford University Press.

Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion* (2nd ed.). Oxford University Press.

Cuomo, S., Schiano Di Cola, V., Giampaolo, F., Rozza, G., Raissi, M., & Piccialli, F. (2022). Scientific machine learning through physics-informed neural networks: Where we are and what's next. *Journal of Scientific Computing, 92*, 88. https://doi.org/10.1007/s10915-022-01939-z

Cussler, E. L. (2009). *Diffusion: Mass transfer in fluid systems* (3rd ed.). Cambridge University Press.

Ferziger, J. H., & Perić, M. (2002). *Computational methods for fluid dynamics* (3rd ed.). Springer.

Geankoplis, C. J. (2003). *Transport processes and separation process principles* (4th ed.). Prentice Hall.

Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2017). *Fundamentals of heat and mass transfer* (8th ed.). John Wiley & Sons.

Karniadakis, G. E., Kevrekidis, I. G., Lu, L., Perdikaris, P., Wang, S., & Yang, L. (2021). Physics-informed machine learning. *Nature Reviews Physics, 3*, 422–440. https://doi.org/10.1038/s42254-021-00314-5

Logan, J. D. (2012). *Transport modeling in hydrogeochemical systems*. Springer.

Özisik, M. N. (1993). *Heat conduction* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Raissi, M., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics, 378*, 686–707. https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method* (2nd ed.). Pearson Education.

Willard, J., Jia, X., Xu, S., Steinbach, M., & Kumar, V. (2022). Integrating physics-based modeling with machine learning: A survey. *ACM Computing Surveys, 55*(7), 1–37. https://doi.org/10.1145/3533378