

Pengaruh Diameter Pipa dan Kecepatan Aliran terhadap Potensi *Self-Cleansing* Sedimen pada Pipa Bertekanan

Muhammad Syafaat S Kuba^{1*}, Muhammad Saleh Pallu¹, Bambang Bakri¹

¹Departemen Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin, Makassar, INDONESIA

*Corresponding author: syafaat_skuba@unismuh.ac.id

INTISARI

Sedimentasi pada pipa bertekanan merupakan permasalahan penting dalam sistem hidraulik karena dapat mengurangi luas penampang aliran efektif, meningkatkan kehilangan energi, serta menurunkan efisiensi operasional jaringan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh diameter pipa dan kecepatan aliran terhadap potensi *self-cleansing* sedimen dengan menggunakan pendekatan *Self-Cleansing Index* (SCI). Penelitian dilakukan melalui analisis kuantitatif terhadap 27 data eksperimen laboratorium pada pipa berdiameter 0,05 m, 0,075 m, dan 0,10 m, dengan variasi *head* 0,15–0,25 m serta ukuran butir sedimen 0,25–0,60 mm pada kondisi aliran turbulen penuh. Parameter yang dianalisis meliputi kecepatan aliran, tegangan geser dasar, tegangan geser kritis, massa deposisi, deposisi ternormalisasi, dan nilai SCI. Hasil penelitian menunjukkan bahwa, pada dataset yang digunakan, peningkatan diameter pipa cenderung diikuti oleh kenaikan kecepatan aliran dan nilai SCI, serta penurunan massa deposisi. Nilai SCI berada pada kisaran 0,1348–0,8276, yang mengindikasikan bahwa seluruh kondisi pengujian masih berada dalam rezim deposisi dan belum mencapai kondisi *self-cleansing* penuh. Temuan ini menegaskan bahwa evaluasi potensi sedimentasi pada pipa bertekanan akan lebih representatif apabila mempertimbangkan rasio antara tegangan geser terapan dan tegangan geser kritis sedimen, dibandingkan hanya menggunakan kecepatan aliran sebagai indikator tunggal. Dengan demikian, SCI dapat digunakan sebagai parameter evaluatif yang lebih komprehensif dalam perencanaan dan pengoperasian sistem perpipaan.

Kata kunci: diameter pipa, kecepatan aliran, sedimentasi, *self-cleansing*, tegangan geser

1 PENDAHULUAN

Sedimentasi pada sistem pipa bertekanan merupakan salah satu persoalan hidraulik yang penting pada jaringan drainase, *sewer*, dan sistem perpipaan lainnya (Montes et al., 2021). Akumulasi partikel padat di dasar pipa dapat memperkecil luas penampang aliran efektif, meningkatkan kekasaran hidraulik, menaikkan kehilangan energi, serta menurunkan kapasitas pengaliran. Dalam sistem drainase perkotaan, endapan sedimen juga berkaitan dengan meningkatnya beban pemeliharaan, penurunan kinerja operasional, dan bertambahnya risiko gangguan layanan apabila pengendapan berlangsung secara terus-menerus. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa keberadaan deposit sedimen secara nyata memengaruhi performa hidraulik saluran tertutup dan *sewer*, baik melalui penyempitan penampang maupun peningkatan tahanan aliran (Luo et al., 2021).

Secara mekanistik, awal gerak partikel sedimen ditentukan oleh keseimbangan antara gaya penggerak hidraulik dan gaya tahanan partikel. Sedimen mulai terangkut ketika tegangan geser dasar yang bekerja telah melampaui tegangan geser kritis, yang secara klasik dijelaskan melalui konsep ambang gerak partikel dan parameter Shields. Dengan demikian, proses sedimentasi dan *self-cleansing* pada dasarnya bukan hanya persoalan besarnya debit atau kecepatan aliran, melainkan persoalan apakah gaya geser yang dihasilkan aliran sudah cukup untuk melepaskan dan menggerakkan partikel dari dasar pipa (Ebtehaj et al., 2020). Kajian eksperimental tentang ambang gerak pasir juga menunjukkan bahwa perubahan kekasaran dasar dapat mengubah tegangan geser, bahkan ketika kecepatan aliran tidak banyak berubah, sehingga pendekatan berbasis tegangan geser menjadi lebih representatif untuk menjelaskan inisiasi gerak sedimen (Montes et al., 2020; Mohtar et al., 2022; Murali et al., 2020).

Dalam praktik perencanaan, kondisi *self-cleansing* secara tradisional sering dievaluasi menggunakan kriteria kecepatan minimum. Pendekatan ini memang sederhana dan mudah diterapkan, tetapi berbagai studi menunjukkan bahwa penggunaan kecepatan minimum sebagai satu-satunya indikator sering kali terlalu menyederhanakan

fenomena *sediment transport* (Safari & Shirzad, 2019; Bong, 2014, 2016). Pengembangan metodologi desain *self-cleansing* pada *sewer* sejak lama telah menekankan bahwa pengangkutan sedimen lebih tepat dianalisis dengan prinsip *sediment transport* dan *tractive force* daripada hanya berdasarkan kecepatan rata-rata. Penelitian lain juga memperlihatkan bahwa model prediksi kecepatan *self-cleansing* yang lebih baru perlu memasukkan karakteristik sedimen, konsentrasi, dan kondisi dasar aliran karena hubungan antara kecepatan dan *non-deposition* bersifat kompleks dan tidak selalu linier. Dengan kata lain, kecepatan aliran tetap penting, tetapi tidak cukup berdiri sendiri untuk menjelaskan kestabilan sedimen di dalam pipa (Hu et al., 2025; Shirazi et al., 2010; Montes et al., 2020).

Selain itu, perilaku endapan dalam pipa tertutup juga dipengaruhi oleh distribusi tegangan geser lokal, struktur turbulensi, dan interaksi aliran–sedimen di dekat dasar pipa. Pada sistem *sewer* dan pipa tertutup, endapan tidak hanya bergantung pada kecepatan rerata, tetapi juga pada bagaimana tegangan geser terdistribusi di keliling basah, khususnya pada bagian invert pipa tempat sedimen cenderung terakumulasi (Song et al., 2020). Studi tentang performa hidraulik *sewer* dengan deposit sedimen menunjukkan bahwa perubahan bentuk dasar endapan dan peningkatan tahanan akibat deposit dapat mengubah karakteristik aliran secara signifikan. Karena itu, evaluasi *self-cleansing* yang hanya berbasis kecepatan berpotensi menghasilkan interpretasi yang kurang akurat terhadap kemampuan aktual aliran dalam mencegah deposisi permanen (Regueiro-Picallo et al., 2023).

Berdasarkan landasan tersebut, penelitian ini memfokuskan pembahasan pada dua variabel yang paling relevan dalam desain hidraulik, yaitu diameter pipa dan kecepatan aliran. Diameter pipa memengaruhi kondisi geometrik aliran dan distribusi gaya geser, sedangkan kecepatan aliran berhubungan langsung dengan intensitas gaya penggerak yang bekerja pada partikel sedimen (Gul et al., 2021). Oleh karena itu, artikel ini bertujuan untuk menjelaskan bagaimana perubahan diameter pipa dan kecepatan aliran memengaruhi sedimentasi pada aliran dalam pipa, serta bagaimana kedua variabel tersebut berhubungan dengan kondisi *self-cleansing* melalui pendekatan SCI (Zhao & Nepf, 2021). Dengan fokus ini, analisis tidak hanya berhenti pada hubungan deskriptif antara kecepatan dan deposisi, tetapi juga menempatkan fenomena sedimentasi dalam kerangka keseimbangan tegangan geser yang lebih kuat secara hidraulik.

2 METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan analisis kuantitatif berbasis data eksperimen laboratorium yang diadopsi dari studi Bong, 2014, yang membahas fenomena *self-cleansing* sedimen pada pipa bertekanan. Sistem pengujian menggunakan instalasi hidraulik berupa pipa tertutup dengan variabel utama diameter pipa (D), *head* hidraulik (H), dan ukuran butir sedimen (d). Diameter pipa yang diuji adalah 0,05 m, 0,075 m, dan 0,10 m, sedangkan *head* hidraulik divariasikan pada 0,15 m, 0,20 m, dan 0,25 m. Ukuran butir sedimen yang digunakan berada pada kisaran 0,25–0,60 mm. Dataset yang dianalisis dalam artikel ini terdiri atas 27 data utama yang mewakili kombinasi variabel penelitian pada kondisi aliran turbulen penuh.

Untuk setiap pengujian, diukur kecepatan aliran rata-rata dan dihitung bilangan Reynolds guna memastikan bahwa seluruh pengujian berlangsung pada kondisi turbulen penuh. Pada data sumber, seluruh nilai Reynolds berada di atas 2×10^4 . Selain itu dihitung tegangan geser dasar (τ_0), tegangan geser kritis (τ_c), massa deposisi sedimen (M), dan Self-Cleansing Index ($SCI = \tau_0/\tau_c$).

Untuk setiap pengujian, diukur kecepatan aliran rata-rata dan dihitung bilangan Reynolds guna memastikan bahwa seluruh pengujian berlangsung pada kondisi turbulen penuh. Selain itu, dihitung tegangan geser dasar (τ_0), tegangan geser kritis (τ_c), massa deposisi sedimen (M), deposisi ternormalisasi (M^*), dan *Self-Cleansing Index* ($SCI = \tau_0/\tau_c$).

Bilangan Reynolds merupakan parameter tak berdimensi yang digunakan untuk menentukan karakteristik rezim aliran dalam pipa, yaitu apakah aliran berada pada kondisi laminar, transisi, atau turbulen. Nilai Reynolds sangat penting dalam analisis hidraulik karena memengaruhi distribusi kecepatan, besarnya kehilangan energi, serta kemampuan aliran dalam mengangkut partikel sedimen. Secara matematis, bilangan Reynolds dinyatakan dengan Persamaan 1 berikut.

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (1)$$

Dimana ρ adalah massa jenis fluida (kg/m^3), V adalah kecepatan rata-rata aliran (m/s), D adalah diameter pipa (m), dan μ adalah viskositas dinamis fluida (s).

Tegangan geser dasar (τ_0) merupakan gaya geser per satuan luas yang bekerja pada batas padat akibat aliran fluida. Dalam konteks aliran pipa bertekanan, parameter ini menjadi salah satu indikator utama untuk menilai potensi penggerusan, pengangkutan, maupun deposisi sedimen di dasar pipa. Berdasarkan pendekatan hidraulik, tegangan geser dasar dapat dihitung menggunakan persamaan 2 berikut:

$$\tau_0 = \rho g R S \quad (2)$$

Dimana τ_0 adalah tegangan geser dasar (N/m^2), ρ adalah massa jenis fluida (kg/m^3), g adalah percepatan gravitasi (m/s^2), R adalah jari-jari hidraulik (m), dan S adalah kemiringan garis energi atau kemiringan hidraulik. Selain menggunakan pendekatan hidraulik, pada kondisi aliran turbulen tegangan geser dasar juga dapat dinyatakan melalui persamaan Darcy–Weisbach. Pendekatan ini menghubungkan tegangan geser dengan faktor gesekan aliran dan kecepatan rata-rata aliran, sehingga banyak digunakan dalam analisis aliran pipa bertekanan. Persamaan tersebut dituliskan sebagai persamaan 3 berikut:

$$\tau_0 = \frac{f}{8} \rho V^2 \quad (3)$$

Pada persamaan tersebut, f adalah faktor gesekan Darcy–Weisbach, ρ adalah massa jenis fluida, dan V adalah kecepatan rata-rata aliran. Tegangan geser dasar menurut rumus ini sebanding dengan kuadrat kecepatan aliran. Artinya, sedikit peningkatan kecepatan dapat menghasilkan peningkatan tegangan geser yang cukup besar.

Tegangan geser kritis (τ_c) adalah nilai minimum tegangan geser yang diperlukan untuk memulai pergerakan partikel sedimen dari kondisi diam. Besaran ini sangat penting dalam kajian transportasi sedimen karena menunjukkan ambang batas awal terjadinya mobilisasi partikel. Untuk sedimen non-kohesif, tegangan geser kritis umumnya dihitung menggunakan kriteria Shields sebagai persamaan 4 berikut:

$$\tau_c = \theta_c (\rho_s - \rho) g d \quad (4)$$

dimana, τ_c adalah tegangan geser kritis (N/m^2), θ_c adalah parameter Shields kritis, ρ_s adalah massa jenis sedimen (kg/m^3), ρ adalah massa jenis fluida (kg/m^3), g adalah percepatan gravitasi (m/s^2), dan d adalah diameter butir sedimen (m).

Dalam penelitian ini, kemampuan aliran untuk membersihkan sedimen secara alami dievaluasi menggunakan Self-Cleansing Index (SCI). Parameter ini dinyatakan sebagai rasio antara tegangan geser dasar aktual terhadap tegangan geser kritis sedimen. Nilai SCI memberikan gambaran apakah aliran yang terjadi telah cukup kuat untuk mencegah akumulasi sedimen di dalam pipa. Persamaan SCI dinyatakan sebagai persamaan 5 berikut:

$$SCI = \frac{\tau_0}{\tau_c} \quad (5)$$

Nlai $SCI > 1$ menunjukkan bahwa tegangan geser aliran telah melampaui tegangan geser kritis, sehingga sedimen berpotensi mulai bergerak atau terangkut. Sebaliknya, nilai $SCI < 1$ mengindikasikan bahwa gaya aliran belum cukup untuk memobilisasi sedimen, sehingga kemungkinan deposisi masih dapat terjadi.

Analisis dilakukan melalui tiga tahap. Pertama, dilakukan telaah deskriptif terhadap data utama untuk melihat perubahan kecepatan, SCI, dan deposisi pada variasi diameter pipa dan ukuran butir sedimen. Kedua, dilakukan interpretasi hubungan kecepatan aliran terhadap sedimentasi melalui perubahan tegangan geser dasar. Ketiga, hasil dianalisis menggunakan kerangka SCI untuk mengidentifikasi rezim deposisi, transisi, dan *self-cleansing*.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

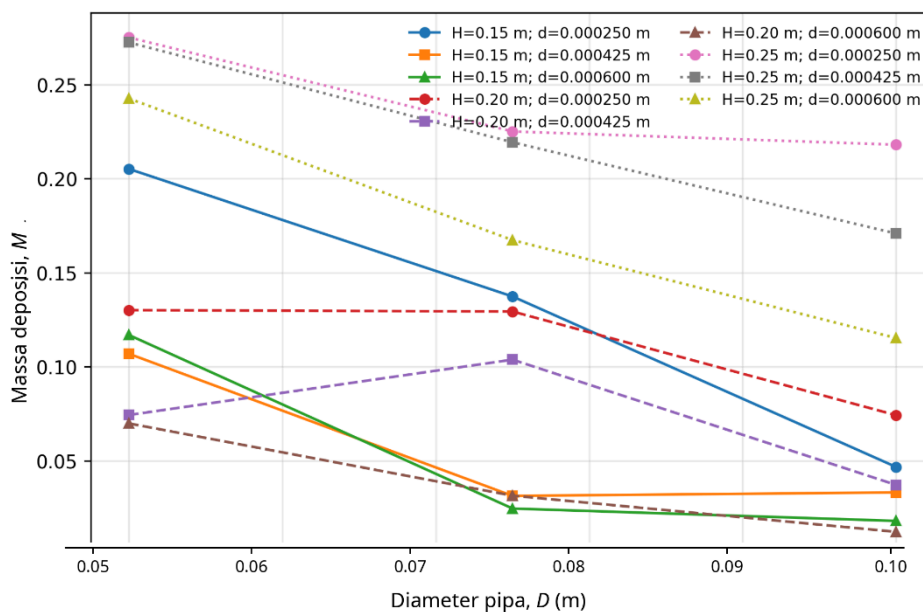
3.1 Pengaruh Diameter Pipa terhadap Sedimentasi

Hasil analisis menunjukkan bahwa diameter pipa berpengaruh terhadap massa deposisi sedimen dalam pipa bertekanan. Pada data yang dianalisis, kenaikan diameter pipa dari 0,5 menjadi 0,75 dan 1,0 umumnya diikuti oleh penurunan massa deposisi, terutama pada kondisi head rendah hingga sedang. Pola ini terlihat jelas pada ukuran butir 0,00025 m dan $H = 0,15$, dimana nilai massa deposisi (M) menurun dari 0,2051 pada $D = 0,05$, menjadi

0,1373 pada $D = 0,075$, dan turun lagi menjadi 0,0467 pada $D = 0,1$. Kecenderungan yang sama juga tampak pada ukuran butir 0,000425 m, yaitu dari 0,1068 menjadi 0,0313 dan 0,0331, serta pada ukuran butir 0,0006 m, yaitu dari 0,1168 menjadi 0,0246 dan 0,0180 yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Temuan tersebut menunjukkan bahwa diameter pipa yang lebih besar cenderung menghasilkan kondisi aliran yang lebih efektif dalam menekan pembentukan endapan. Secara hidraulik, hal ini berkaitan dengan meningkatnya kecepatan aliran dan tegangan geser dasar pada pipa berdiameter lebih besar dalam dataset ini. Sebagai contoh, pada $H = 0,15$ m dan $d = 0,00025$ m, peningkatan diameter dari 0,05 m ke 0,1 m menyebabkan kecepatan aliran meningkat dari 0,429 m/s menjadi 0,821 m/s, sementara tegangan geser dasar naik dari 0,0589 Pa menjadi 0,1686 Pa. Peningkatan gaya geser ini memperbesar kemampuan aliran untuk mengurangi deposisi sedimen.

Meskipun demikian, hubungan antara diameter pipa dan massa deposisi tidak sepenuhnya linier pada seluruh kondisi. Pada $H = 0,25$ m, misalnya, massa deposisi pada beberapa kombinasi justru meningkat kembali. Untuk ukuran butir 0,00025 m, nilai M pada $D = 0,075$ m mencapai 0,2250, dan pada $D = 0,10$ m sebesar 0,2180, lebih tinggi dibanding beberapa kondisi *head* yang lebih rendah. Hal ini mengindikasikan bahwa selain diameter pipa, deposisi sedimen juga dipengaruhi oleh interaksi variabel lain, seperti *head*, distribusi partikel, dan kemungkinan redeposisi sedimen selama pengujian.



Gambar 1 Hubungan antara Diameter Pipa dan Massa Deposisi

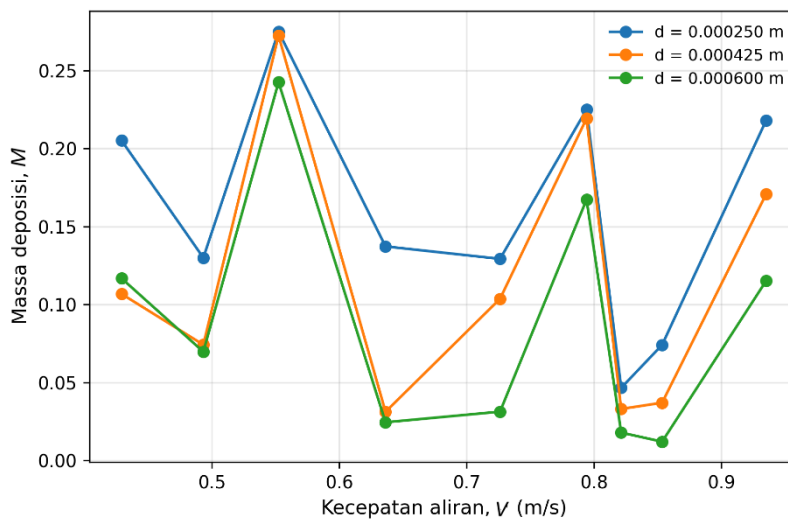
Secara umum dapat dinyatakan bahwa diameter pipa merupakan variabel geometrik yang berperan penting dalam menentukan besarnya massa deposisi. Pada kondisi penelitian ini, pipa berdiameter lebih besar cenderung memberikan kondisi hidraulik yang lebih mendukung pengurangan endapan, walaupun respons deposisi tetap dipengaruhi oleh ukuran butir dan kondisi aliran secara keseluruhan.

3.2 Pengaruh Kecepatan Aliran terhadap Sedimentasi

Kecepatan aliran merupakan parameter hidraulik utama yang memengaruhi pengendapan sedimen. Data menunjukkan bahwa peningkatan *head* hidraulik dari 0,15 m menjadi 0,20 m dan 0,25 m meningkatkan kecepatan aliran pada setiap variasi diameter pipa. Peningkatan ini menunjukkan bahwa energi aliran yang lebih besar cenderung memperkuat kemampuan angkut partikel sedimen. Kenaikan kecepatan ini sejalan dengan peningkatan

tegangan geser dasar. Pada diameter 0,05 m, nilai tegangan geser dasar meningkat dari 0,0589 Pa menjadi 0,0730 Pa dan 0,0812 Pa. Pada diameter 0,10 m, nilainya meningkat dari 0,1686 Pa menjadi 0,1730 Pa dan 0,1940 Pa. Dengan demikian, peningkatan kecepatan aliran pada umumnya diikuti oleh peningkatan gaya geser yang bekerja pada dasar pipa.

Dari sisi massa deposisi, pengaruh kecepatan aliran tidak menunjukkan pola penurunan yang sepenuhnya konsisten pada seluruh kondisi pengujian. Pada diameter 0,05 m dan ukuran butir 0,00025 m, massa deposisi turun dari 0,2051 pada $H = 0,15$ m menjadi 0,1534 pada $H = 0,20$ m, tetapi kembali meningkat pada $H = 0,25$ m. Pola ini menunjukkan bahwa kenaikan kecepatan belum selalu berimplikasi langsung pada pengurangan endapan. Di sisi lain, pada ukuran butir yang lebih besar, khususnya 0,000425 m dan 0,0006 m, peningkatan kecepatan cenderung menghasilkan deposisi yang lebih rendah pada banyak kondisi. Misalnya, pada diameter 0,10 m dan ukuran butir 0,0006 m, massa deposisi berada pada tingkat yang relatif rendah dibandingkan diameter yang lebih kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa pengaruh kecepatan aliran terhadap sedimentasi tetap nyata, tetapi responsnya dipengaruhi oleh ukuran butir dan dinamika lokal pengangkutan partikel. Ilustrasi ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Hubungan antara kecepatan aliran dan massa deposisi

Dengan demikian, kecepatan aliran dapat dinyatakan sebagai variabel yang sangat penting dalam pengendalian sedimentasi, tetapi pengaruhnya terhadap massa deposisi bersifat kompleks. Massa endapan tidak hanya ditentukan oleh besarnya kecepatan rata-rata, tetapi juga oleh distribusi tegangan geser, karakteristik butiran, serta kemungkinan terjadinya redeposisi selama proses pengujian.

3.3 Evaluasi Kondisi *Self-Cleansing* Berdasarkan SCI

Evaluasi kondisi *self-cleansing* pada penelitian ini dilakukan menggunakan *Self-Cleansing Index* (SCI), yaitu rasio antara tegangan geser dasar dan tegangan geser kritis. Parameter ini digunakan untuk menilai apakah gaya geser yang dibangkitkan aliran telah cukup untuk memobilisasi sedimen pada dasar pipa.

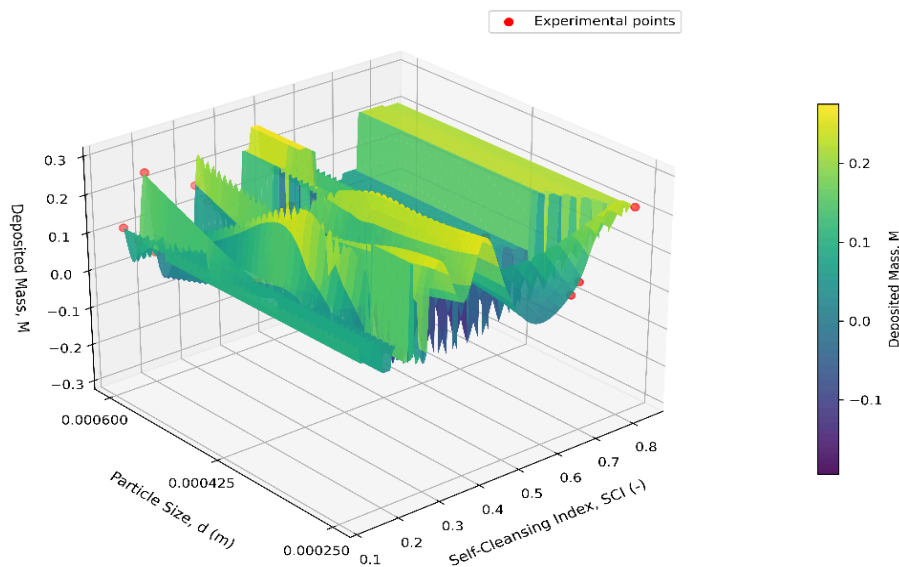
Berdasarkan data, nilai SCI berada pada rentang 0,1348 hingga 0,8276. Nilai minimum terjadi pada kondisi $D = 0,05$, $H = 0,15$, dan $d = 0,0006$ m, sedangkan nilai maksimum terjadi pada kondisi $D = 0,1$, $H = 0,25$, dan $d = 0,00025$ m. Seluruh nilai tersebut masih berada pada $SCI < 1$, yang menunjukkan bahwa semua kondisi pengujian dalam dataset ini masih termasuk dalam rezim deposisi dan belum mencapai kondisi *self-cleansing* penuh.

Pola perubahan SCI menunjukkan bahwa nilai ini meningkat dengan bertambahnya diameter pipa dan head, tetapi menurun dengan bertambahnya ukuran butir sedimen. Sebagai contoh, pada ukuran butir 0,00025 m dan $H = 0,15$

m, nilai SCI meningkat seiring bertambahnya diameter pipa, yang menunjukkan meningkatnya kemampuan aliran untuk mendekati kondisi *self-cleansing*. Hasil ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Perbandingan kinerja kriteria berbasis kecepatan dan SCI

Metrik	Velocity-Based	SCI-Based
Accuracy	0,60	0,782
Sensitivity	1,00	0,50
Specificity	0,29	1,00
False Positives	22	0
False Negatives	0	12
Risk-Weighted Cost	110	12



Gambar 3 Nilai SCI berdasarkan massa deposisi

Hal yang sama terlihat pada pengaruh ukuran butir. Untuk diameter dan *head* yang sama, kenaikan ukuran butir menyebabkan tegangan geser kritis meningkat, sehingga nilai SCI menurun. Sebagai contoh, pada $D = 0,10$ m dan $H = 0,25$ m, nilai SCI menurun ketika ukuran butir bertambah, yang menunjukkan bahwa partikel yang lebih kasar memerlukan gaya geser yang lebih besar untuk mulai terangkut.

Hubungan antara diameter partikel/diameter pipa (d), Self-Cleansing Index (SCI), dan massa deposisi (M) digambarkan menggunakan pendekatan grafik empiris dengan menghubungkan titik-titik data hasil eksperimen secara linier. Pendekatan ini bertujuan untuk menunjukkan kecenderungan perubahan nilai M terhadap variasi parameter hidraulik dan karakteristik sedimen, tanpa menerapkan model interpolasi orde tinggi. Dengan demikian, grafik berfungsi sebagai alat interpretasi visual terhadap pola hubungan antarvariabel. Berdasarkan ilustrasi pada Gambar 3, diketahui SCI memberikan gambaran yang lebih representatif dibanding kecepatan aliran saja. Kecepatan yang tinggi belum tentu cukup untuk mencapai *self-cleansing* apabila tegangan geser kritis partikel juga tinggi. Oleh sebab itu, SCI dapat digunakan sebagai parameter evaluatif yang lebih tepat dalam menilai potensi sedimentasi pada pipa bertekanan.

3.4 Implikasi untuk Desain dan Operasi Pipa

Implikasi penelitian ini dapat dirumuskan dalam tiga aspek utama yang saling berkaitan. Pertama, diameter pipa terbukti memengaruhi massa deposisi melalui perubahan kondisi hidraulik, khususnya kecepatan aliran dan tegangan geser dasar, di mana pipa berdiameter lebih besar cenderung menghasilkan massa deposisi yang lebih rendah pada berbagai kondisi pengujian, sehingga pemilihan diameter yang tepat menjadi strategi penting dalam meminimalkan sedimentasi. Kedua, peningkatan kecepatan aliran secara umum meningkatkan tegangan geser dasar dan kapasitas angkut sedimen, namun hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan tersebut tidak selalu

menghasilkan penurunan deposisi secara konsisten, sehingga pendekatan desain yang hanya berfokus pada kecepatan minimum belum cukup untuk merepresentasikan kinerja *self-cleansing* secara komprehensif. Ketiga, evaluasi menggunakan *Sediment Carrying Index* (SCI) menunjukkan bahwa seluruh kondisi pengujian masih berada dalam rezim deposisi karena nilai SCI belum mencapai ambang kritis ($SCI \geq 1$), yang mengindikasikan bahwa gaya hidraulik aliran masih belum memadai untuk mencegah pengendapan secara penuh; oleh karena itu, perancangan sistem perpipaan sebaiknya tidak hanya didasarkan pada kecepatan rata-rata, tetapi juga mempertimbangkan rasio antara tegangan geser dasar dan tegangan geser kritis sedimen sebagai indikator utama dalam menilai kinerja *self-cleansing*.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa desain pipa bertekanan yang mempertimbangkan diameter pipa, kecepatan aliran, ukuran butir sedimen, dan SCI akan lebih akurat dalam memprediksi potensi sedimentasi dibanding pendekatan konvensional berbasis kecepatan semata. Pendekatan ini penting terutama untuk sistem yang berisiko mengalami pengendapan, seperti jaringan drainase tertutup, *sewer*, dan pipa distribusi yang membawa partikel padat dalam alirannya.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis terhadap pengaruh diameter pipa, kecepatan aliran, dan kondisi *self-cleansing* pada aliran dalam pipa bertekanan, dapat disimpulkan bahwa diameter pipa berpengaruh terhadap massa deposisi sedimen. Pada sebagian besar kondisi pengujian, peningkatan diameter pipa cenderung menurunkan massa deposisi karena diikuti oleh peningkatan kecepatan aliran dan tegangan geser dasar. Dengan demikian, diameter pipa yang lebih besar dalam konfigurasi penelitian ini memberikan kondisi hidraulik yang lebih mendukung pengurangan endapan sedimen.

Kecepatan aliran juga terbukti menjadi parameter penting dalam pengendalian sedimentasi. Peningkatan head hidraulik meningkatkan kecepatan aliran dan tegangan geser dasar pada seluruh variasi diameter pipa. Namun, pengaruh kecepatan terhadap massa deposisi tidak selalu menunjukkan pola penurunan yang sepenuhnya konsisten pada semua kondisi. Hal ini menunjukkan bahwa sedimentasi dalam pipa tidak hanya ditentukan oleh kecepatan aliran, tetapi juga dipengaruhi oleh ukuran butir sedimen dan interaksi antara gaya penggerak aliran dengan tahanan partikel. Evaluasi menggunakan *Self-Cleansing Index* (SCI) menunjukkan bahwa seluruh nilai SCI pada dataset ini masih berada pada rentang 0,1348–0,8276, atau seluruhnya lebih kecil dari 1. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa semua skenario pengujian masih berada dalam rezim deposisi dan belum mencapai kondisi *self-cleansing* penuh. Meskipun demikian, peningkatan diameter pipa dan kecepatan aliran terbukti meningkatkan nilai SCI, sedangkan peningkatan ukuran butir sedimen menurunkan nilai SCI.

Hasil penelitian ini menegaskan bahwa evaluasi sedimentasi pada pipa bertekanan akan lebih representatif apabila tidak hanya menggunakan kecepatan aliran sebagai indikator, tetapi juga mempertimbangkan rasio antara tegangan geser dasar dan tegangan geser kritis melalui SCI. Oleh karena itu, dalam desain hidraulik pipa yang berpotensi mengalami sedimentasi, pendekatan berbasis SCI dapat digunakan sebagai parameter tambahan untuk menilai kecenderungan deposisi dan kemampuan *self-cleansing* aliran.

REFERENSI

- Bong, C. (2014). A Review on the Self-Cleansing Design Criteria for Sewer System. *Journal of Civil Engineering Science and Technology*, 5(2), 1-7. <https://doi.org/10.33736/jcest.132.2014>.
- Bong, C. (2016). Untitled. *Journal of Civil Engineering Science and Technology*, 5(2). <https://doi.org/10.33736/jcest.v5i2>.
- Cerbus, R. T., Liu, C.-C., Gioia, G., & Chakraborty, P. (2018). Laws of resistance in transitional pipe flows. *Physical Review Letters*, 120(5), 054502.
- Ebtehaj, I., Bonakdari, H., Zaji, A., & Gharabaghi, B. (2020). Evolutionary optimization of neural network to

- predict sediment transport without sedimentation. *Complex & Intelligent Systems*, 7(1), 401-416. <https://doi.org/10.1007/s40747-020-00213-9>
- Fan, C., Field, R., Lai, F., & Sullivan, D. (2000). Sewer-Sediment Control: Overview of an EPA Wet-Weather Flow (WWF) Research Program., 1-9. [https://doi.org/10.1061/40517\(2000\)286](https://doi.org/10.1061/40517(2000)286).
- Fan, C., Field, R., Pisano, W., Barsanti, J., & Joyce, J. (1999). Sewer and Tank Flushing for Corrosion and Pollution Control., 1-7. [https://doi.org/10.1061/40430\(1999\)203](https://doi.org/10.1061/40430(1999)203).
- Fraser, A., Ashley, R., & Ghani, A. (2000). Inlet and Sewer Traps for Sediment Control in Stormwater Drainage - A Malaysian Case Study., 99, 1-8. [https://doi.org/10.1061/40517\(2000\)151](https://doi.org/10.1061/40517(2000)151)
- Gül, E., Safari, M., Haghighi, A., & Mehr, A. (2021). Sediment transport modeling in non-deposition with clean bed condition using different tree-based algorithms. *Plos One*, 16(10), e0258125. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0258125>
- Hu, F., Ma, S., Xi-mei, Z., Li, W., Cao, Y., Liu, J., ... & Zheng, T. (2025). Analysis of Sedimentation Mechanisms in Small Diameter Gravity Sewers Based on Computational Fluid Dynamics. *AcS Es&t Water*, 5(2), 993-1002. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.4c01036>
- Ihmoudah, A., Abugharara, A., Rahman, M. A., & Butt, S. (2023). Experimental and numerical analysis of the effect of rheological models on measurements of shear-thinning fluid flow in smooth pipes. *Energies*, 16(8), 3478.
- Mohtar, W., Bong, C., Ghani, A., Safari, M., Taib, A., Afan, H., ... & El-Shafie, A. (2022). Sediment Incipient Motion in Sewer with a Bed Deposit. *Teknik Dergi*, 33(1), 11473-11486. <https://doi.org/10.18400/tekderg.572529>
- Montes, C., Kapelan, Z., & Saldarriaga, J. (2021). Predicting non-deposition sediment transport in sewer pipes using Random forest. *Water Research*, 189, 116639. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116639>
- Montes, C., Vanegas, S., Kapelan, Z., Berardi, L., & Saldarriaga, J. (2020). Non-deposition self-cleansing models for large sewer pipes. *Water Science & Technology*, 81(3), 606-621. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.154>
- Murali, M., Hipsey, M., Ghadouani, A., & Yuan, Z. (2020). SewerSedFoam: A Model for Free Surface Flow, Sediment Transport, and Deposited Bed Morphology in Sewers. *Water*, 12(1), 270. <https://doi.org/10.3390/w12010270>
- Niazi, M., Nietch, C., Maghrebi, M., Jackson, N., Bennett, B., Tryby, M., ... & Massoudieh, A. (2017). Storm Water Management Model: Performance Review and Gap Analysis. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 3(2). <https://doi.org/10.1061/jswbay.0000817>
- Regueiro-Picallo, M., Anta, J., Naves, A., Figueroa, A., & Rieckermann, J. (2023). Towards urban drainage sediment accumulation monitoring using temperature sensors. *Environmental Science Water Research & Technology*, 9(12), 3200-3212. <https://doi.org/10.1039/d2ew00820c>
- Rinas, M., Fricke, A., Tränckner, J., Frischmuth, K., & Koegst, T. (2020). Sediment Transport in Sewage Pressure Pipes, Part II: 1 D Numerical Simulation. *Water*, 12(1), 282. <https://doi.org/10.3390/w12010282>
- Safari, M. (2019). Decision tree (DT), generalized regression neural network (GR) and multivariate adaptive regression splines (MARS) models for sediment transport in sewer pipes. *Water Science & Technology*, 79(6), 1113-1122. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.106>
- Safari, M. and Shirzad, A. (2019). Self-cleansing design of sewers: Definition of the optimum deposited bed thickness. *Water Environment Research*, 91(5), 407-416. <https://doi.org/10.1002/wer.1037>
- Salvo, C., Mancini, M., Cavinato, G., Moscatelli, M., Simionato, M., Stigliano, F., ... & Rodi, A. (2020). A 3D Geological Model as a Base for the Development of a Conceptual Groundwater Scheme in the Area of the Colosseum (Rome, Italy). *Geosciences*, 10(7), 266. <https://doi.org/10.3390/geosciences10070266>
- Seco, I., Schellart, A., Gómez, M., & Tait, S. (2018). Prediction of Organic Combined Sewer Sediment Release and Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(3). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0001422](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001422)
- Shirazi, R., Willems, P., & Berlamont, J. (2010). Application of Flushing Tanks in Simple Sewer Networks for In-Sewer Sediment Erosion and Transport. *Journal of Water Management Modeling*.

<https://doi.org/10.14796/jwmm.r236-07>

- Song, Y., Joo, J., Lee, J., & Yoo, D. (2020). Numerical Assessment of Shear Boundary Layer Formation in Sewer Systems with Fluid-Sediment Phases. *Water*, 12(5), 1332. <https://doi.org/10.3390/w12051332>
- Visintainer, R., Matoušek, V., Pullum, L., & Sellgren, A. (2023). Stratification of slurry flow and deposition of solids in pipes. In *Slurry Transport Using Centrifugal Pumps* (pp. 81–114). Springer.
- Zhao, T. and Nepf, H. (2021). Turbulence Dictates Bedload Transport in Vegetated Channels Without Dependence on Stem Diameter and Arrangement. *Geophysical Research Letters*, 48(21). <https://doi.org/10.1029/2021gl095316>