

Efektivitas Deflektor Silinder Pori Bertulang dalam Mengurangi Kecepatan Aliran di Sekitar Pilar Jembatan

Indira Zahrani Nurizkitha¹, Nenny karim¹, Hamzah Al Imran^{*1}, Sahabuddin Latif²

¹Program Studi Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Makassar

²Program Studi Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Makassar

ABSTRAK

Kecepatan aliran air di sekitar pilar jembatan memiliki peran penting dalam menyebabkan gerusan lokal (local scouring), yang berpotensi merusak stabilitas struktur. Studi ini bertujuan untuk menguji efektivitas deflektor bawah air berbentuk silinder pori bertulang dalam menurunkan kecepatan aliran, sehingga dapat mengurangi risiko gerusan pada fondasi jembatan. Penelitian dilakukan melalui pendekatan eksperimental di Laboratorium Hidraulika Universitas Muhammadiyah Makassar, menggunakan saluran terbuka dengan kondisi yang menyerupai aliran sungai alami. Dua skenario debit digunakan, yaitu Q1 dan Q2, dengan pengamatan kecepatan aliran dilakukan pada interval waktu 5, 10, dan 15 menit. Data diambil pada 15 titik pengamatan di sepanjang saluran, baik sebelum maupun sesudah pemasangan deflektor. Hasil menunjukkan bahwa deflektor mampu menurunkan kecepatan aliran secara signifikan. Pada debit Q1, kecepatan menurun dari rata-rata 0,618 m/dtk menjadi 0,39 m/dtk. Sementara pada Q2, terjadi penurunan dari 0,707 m/dtk menjadi 0,437 m/dtk. Selain itu, pola aliran berubah menjadi lebih stabil dan terkontrol, dengan berkurangnya formasi vorteks yang biasanya menyebabkan erosi. Temuan ini menunjukkan bahwa deflektor silinder pori bertulang efektif sebagai strategi mitigasi gerusan yang adaptif dan efisien. Penggunaan struktur ini diharapkan dapat diterapkan secara luas dalam perencanaan dan perlindungan infrastruktur jembatan di lingkungan sungai berkecepatan tinggi.

ABSTRACT

The velocity of water flow around bridge piers plays a critical role in causing local scour, which threatens structural stability. This study aims to examine the effectiveness of reinforced porous cylindrical underwater deflectors in reducing flow velocity and mitigating scour risk. An experimental approach was conducted at the Hydraulics Laboratory of Universitas Muhammadiyah Makassar using an open channel flume simulating natural river conditions. Two discharge scenarios (Q1 and Q2) were tested, with flow velocities observed at intervals of 5, 10, and 15 minutes. Data collection was carried out at 15 observation points along the channel, both before and after the installation of the deflector. The results show a significant reduction in flow velocity following the use of the deflector. Under Q1, the average velocity decreased from 0.618 m/s to 0.39 m/s, while under Q2, it dropped from 0.707 m/s to 0.437 m/s. Furthermore, the deflector contributed to more stable and controlled flow patterns, reducing vortex formation commonly associated with erosion. These findings demonstrate that reinforced porous cylinder deflectors are an effective, adaptive, and efficient strategy for local scour mitigation. The implementation of such structures offers promising potential in the planning and protection of bridge infrastructure located in high-velocity river environments.

ARTICLE HISTORY

Received January 1, 2026

Received in revised form

January 15 2026

Accepted February 6, 2026

Available online February 9, 2026.

KEYWORDS

Kecepatan Aliran, Pilar Jembatan, Gerusan Lokal, Deflektor Silinder Pori, Perlindungan Struktur Hidraulik.

Flow Velocity, Bridge Pier, Local Scour, Porous Cylinder Deflector, Hydraulic Structure Protection.

1. Pendahuluan

Jembatan merupakan elemen vital dalam sistem transportasi, berperan sebagai penghubung antarwilayah yang memfasilitasi mobilitas manusia dan distribusi barang. Keandalan struktur jembatan sangat ditentukan oleh kekuatan fondasinya, khususnya pada bagian pilar yang berada di dalam aliran sungai. Salah satu permasalahan utama yang sering terjadi adalah gerusan lokal (*local scouring*), yaitu pengikisan tanah di sekitar pilar akibat arus air yang kuat. Fenomena ini telah menjadi penyebab utama kerusakan struktural dan bahkan kegagalan total jembatan di berbagai belahan dunia. Oleh karena itu, diperlukan

strategi proteksi yang efektif untuk meminimalisir risiko tersebut dan memperpanjang umur layanan infrastruktur jembatan.

Gerusan di sekitar pilar jembatan biasanya dipicu oleh tingginya kecepatan aliran air, terutama saat terjadi peningkatan debit akibat curah hujan tinggi atau banjir musiman. Dalam konteks hidrolika, kecepatan aliran berperan penting dalam menentukan besarnya tegangan geser pada dasar sungai, yang pada gilirannya mempercepat pengangkatan dan pemindahan partikel sedimen di sekitar pilar. Penelitian oleh Lee, Lai [1] dan Wang, Hou [2] menunjukkan bahwa kecepatan aliran yang tinggi mampu

membentuk vorteks tapal kuda (horseshoe vortex) dan aliran ke bawah (downflow) yang memperparah laju erosi lokal. Guragain and Tanaka [3] juga menekankan bahwa ambang batas kecepatan tertentu dapat menyebabkan kerusakan signifikan pada fondasi jembatan jika tidak dikendalikan dengan baik.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengatasi permasalahan gerusan, mulai dari pemasangan riprap (batu pelindung), collar (pelat pelindung), hingga vane dan struktur groin. Harasti, Gilja [4] serta Huy [5] mendeskripsikan penggunaan struktur kolom atau pelindung yang mengalihkan pola aliran guna mengurangi intensitas gerusan. Lebih lanjut, pendekatan inovatif yang memanfaatkan material berpori seperti keranjang pasir atau formasi stump buatan telah berhasil menurunkan energi aliran dan mempercepat pengendapan sedimen di sekitar pilar [6,7]. Bahkan, metode pile pengorbanan (sacrificial piles) telah diuji untuk mengubah pola aliran lokal demi mengurangi risiko gerusan [8,9].

Namun demikian, sebagian besar metode tersebut memiliki keterbatasan dalam kondisi aliran berkecepatan tinggi. Misalnya, riprap dapat tersapu arus jika terjadi gaya lateral yang besar, sedangkan pelindung konvensional sering kali tidak mempertimbangkan dinamika aliran kompleks yang terjadi saat banjir ekstrem atau aliran terhambat es [10,11]. Selain itu, intervensi struktur perlindungan dapat menciptakan pola aliran baru yang justru meningkatkan risiko gerusan di titik lain [12,13].

Untuk menjawab tantangan tersebut, penelitian terbaru mulai mengkaji penggunaan deflektor bawah air (underwater current deflector) berbentuk silinder pori bertulang. Struktur ini bekerja dengan cara memecah aliran, mengurangi turbulensi, dan mengalihkan arah arus agar tidak langsung menghantam pilar. Zhang, Menghao [14] melaporkan bahwa struktur berpori semacam ini mampu mengurangi kedalaman gerusan hingga 64% jika dikombinasikan dengan pelat pelindung. Panici and Kripakaran [15] juga mencatat bahwa struktur silinder pori dapat memperbaiki distribusi sedimen dan menstabilkan aliran di sekitar pilar.

Meski menunjukkan hasil yang menjanjikan, penelitian tentang efektivitas deflektor berbentuk silinder pori bertulang masih tergolong terbatas. Banyak studi hanya dilakukan pada konfigurasi statis dan kondisi aliran tertentu, sehingga belum mampu merepresentasikan dinamika sungai secara keseluruhan [16,17]. Selain itu, masih minim kajian terkait daya tahan material dan kinerja jangka panjang dalam menghadapi kondisi ekstrem [18,19]. Dengan demikian, terdapat celah penelitian yang perlu diisi untuk memastikan kelayakan struktur ini sebagai solusi perlindungan jangka panjang terhadap pilar jembatan.

Penelitian ini bertujuan untuk menguji pengaruh kecepatan aliran terhadap efektivitas deflektor bawah air berbentuk silinder pori bertulang dalam menurunkan laju aliran di sekitar pilar jembatan. Uji dilakukan dalam skenario laboratorium menggunakan saluran terbuka, yang mensimulasikan kondisi aliran alami. Nilai kebaruan (novelty) dari studi ini terletak pada penggunaan desain silinder pori bertulang yang belum banyak diterapkan dalam penelitian sebelumnya, serta pendekatan kuantitatif melalui pengukuran kecepatan dan debit di beberapa titik pengamatan. Ruang lingkup penelitian meliputi pengukuran

kecepatan aliran sebelum dan sesudah pemasangan deflektor, analisis perbandingan berdasarkan variasi waktu dan debit, serta interpretasi pola aliran yang terbentuk. Diharapkan, hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan metode perlindungan struktur jembatan yang lebih efektif dan adaptif terhadap dinamika aliran sungai.

2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental di laboratorium hidraulika untuk menganalisis pengaruh deflektor silinder pori bertulang terhadap kecepatan aliran di sekitar pilar jembatan. Pengujian dilakukan pada saluran terbuka dengan model pilar yang ditempatkan di tengah saluran. Eksperimen dilakukan pada dua variasi debit aliran (Q1 dan Q2) dengan dua kondisi pengujian, yaitu tanpa deflektor dan dengan deflektor. Kecepatan aliran diukur pada 15 titik pengamatan di sekitar pilar pada interval waktu 5, 10, dan 15 menit menggunakan alat ukur Flowwatch. Data dianalisis secara komparatif dengan membandingkan nilai rata-rata kecepatan aliran sebelum dan sesudah pemasangan deflektor pada masing-masing variasi debit dengan 2 bukaan pintu Q1 untuk 1 cm dan Q2 untuk 2 cm dan 3 interval waktu pengaliran 5, 10, dan 15 menit

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Hidraulika Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Makassar, Indonesia. Durasi kegiatan eksperimen berlangsung selama tiga bulan, mencakup tahap persiapan model, pengujian sistem aliran di laboratorium, dan analisis data hasil pengamatan. Tahap awal dimulai pada tanggal 24 Mei, yang mencakup pembuatan model fisik dan penyesuaian sistem aliran terbuka sesuai dengan desain eksperimental. Selanjutnya dilakukan pengukuran secara sistematis selama dua bulan berikutnya sampai pada tanggal 29 Juli.

Gambar 1 Lokasi Penelitian mengilustrasikan lokasi terpilih Laboratorium Hidraulika Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Makassar, Indonesia, yang dipilih berdasarkan adanya saluran terbuka yang dapat mencakup model penelitian yang akan dilakukan.



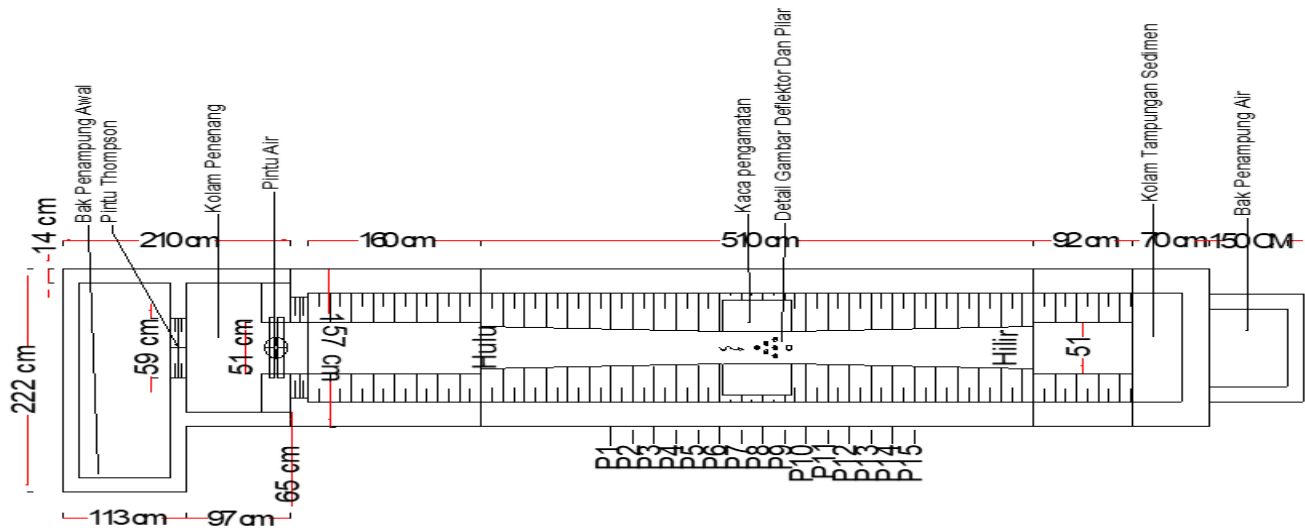
Gambar 1. Lokasi Penelitian

2.2 Pengumpulan dan Analisis Data

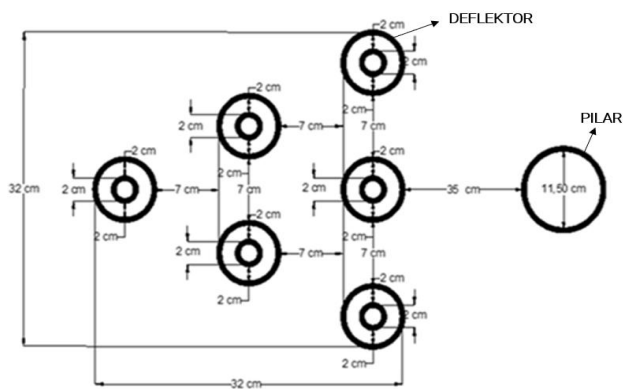
Eksperimen dilakukan menggunakan saluran terbuka berbentuk trapezium yang didesain menyerupai kondisi aliran alami sungai. Saluran ini terbuat dari beton dan terdapat kaca permanen untuk mengawasi terjadinya aliran air pada pilar dan deflektor dengan dasar tanah berlapis pasir, memiliki lebar dasar 51 cm, lebar atas 109 cm, tinggi 42 cm, dan panjang total 762 cm. Di bagian hulu terdapat bak penampung air berukuran 222 cm × 113 cm dengan ketebalan 14 cm, dilengkapi dengan pintu Thompson dan kolam penenang untuk menjaga kestabilan aliran.

Model deflektor berbentuk silinder pori bertulang ditempatkan di tengah saluran bersamaan dengan model

pilar jembatan, dengan tata letak serta dimensi yang dirancang secara cermat dan presisi menggunakan perangkat lunak AutoCAD. Perancangan ini memastikan kesesuaian geometrik dan konsistensi posisi antar elemen model, sementara titik-titik pengamatan kecepatan aliran (P1 hingga P15) didistribusikan secara merata di sepanjang saluran untuk memperoleh gambaran aliran yang komprehensif. Visualisasi keseluruhan sistem penelitian ditunjukkan pada [Gambar 2](#) yang menampilkan kondisi saluran terbuka selama proses eksperimen, [Gambar 3](#) yang memperlihatkan konfigurasi penempatan pilar dan deflektor dalam AutoCAD, serta [Gambar 4](#) yang menyajikan detail dimensi dan bentuk deflektor secara rinci.



Gambar 2 Saluran Terbuka Yang Digunakan



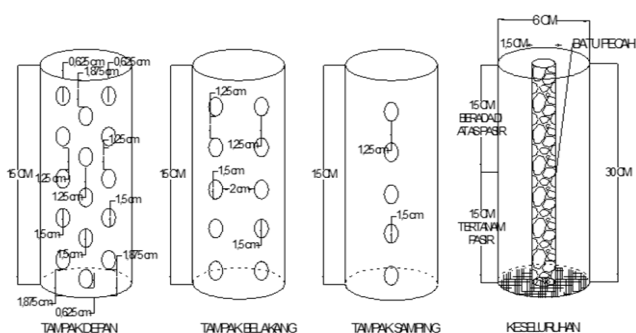
Gambar 3. Detail Pemasangan Deflektor Dan Pilar Pada Saluran

2.3 Data dan Variabel

Jenis data utama yang dikumpulkan adalah kecepatan aliran (v) dan kedalaman aliran (h) pada berbagai titik pengamatan di sepanjang saluran. Variabel bebas dalam eksperimen ini mencakup keberadaan deflektor (ada/tidak) dan tinggi muka air yang ditentukan berdasarkan bukaan pintu (Q1 dan Q2). Sementara itu, variabel terikat adalah perubahan kecepatan aliran di sekitar pilar. Pengukuran dilakukan pada kondisi aliran yang dikondisikan untuk menyerupai debit sungai kecil hingga sedang. Setiap skenario dilakukan dengan tiga interval waktu: 5 menit, 10 menit, dan 15 menit, untuk memantau perubahan kecepatan dalam durasi pengaliran berbeda.

Deflektor yang digunakan dalam penelitian ini Silinder Pori Bertulang (SPB) terbuat dari bahan akrilik dan dipasang di bagian depan pilar jembatan. Deflektor SPB memiliki tinggi 20 cm, diameter 6 cm, diameter lubang pori 1,5 cm, serta dilengkapi tulangan dengan diameter 2 cm. Jarak pemasangan deflektor terhadap pilar divariasikan sesuai dengan skenario pengujian. Model deflektor dan pilar jembatan dirancang berdasarkan kesebangunan geometrik antara model laboratorium dan kondisi lapangan dengan skala permodelan 1:10, sehingga setiap 1 cm pada model merepresentasikan 10 cm pada prototipe di lapangan.

Pada skala tersebut, deflektor SPB pada model memiliki tinggi 20 cm yang merepresentasikan tinggi deflektor di lapangan sebesar 2,0 m, dengan diameter model 6 cm yang setara dengan 0,60 m pada prototipe. Diameter lubang pori



Gambar 4. Detail Ukuran Deflektor

pada model sebesar 1,5 cm merepresentasikan diameter pori di lapangan sebesar 0,15 m, sedangkan diameter tulangan model sebesar 2 cm merepresentasikan tulangan prototipe dengan diameter 0,20 m.

Penerapan skala permodelan ini bertujuan untuk memastikan bahwa rasio dimensi utama, seperti tinggi deflektor, diameter, dan ukuran pori, tetap proporsional antara model dan prototipe, sehingga pola aliran dan mekanisme gerusan yang terbentuk pada pengujian laboratorium dapat mewakili kondisi sebenarnya di lapangan. Dengan mempertahankan kesebangunan geometrik tersebut, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang relevan mengenai efektivitas Underwater Current Deflector dalam mengendalikan aliran dan mengurangi gerusan di sekitar pilar jembatan pada kondisi prototipe.

2.4 Teknik Pengukuran Kecepatan Aliran

Teknik pengukuran kecepatan aliran mengikuti pendekatan yang direkomendasikan dalam literatur teknik hidraulik eksperimental. Kecepatan diukur menggunakan metode manual terkalibrasi pada setiap titik pengamatan (P1–P15), dengan pembacaan pada tiga periode waktu yang berbeda. Debit aliran diatur melalui bukaan pintu pada dua kondisi debit: Q1 (bukaan 1 cm) dan Q2 (bukaan 2 cm).

Teknologi seperti Acoustic Doppler Velocimeters (ADV) dan Particle Image Velocimetry (PIV) seperti digunakan oleh Song & Xie (2023), dapat memberikan hasil lebih presisi. Namun, dalam keterbatasan laboratorium, digunakan metode konvensional yang tetap memenuhi syarat pengukuran teknis dan representatif.

2.5 Analisis Data

Data yang diperoleh dianalisis secara komparatif antara dua kondisi utama: tanpa deflektor dan dengan deflektor silinder pori bertulang. Analisis dilakukan untuk masing-masing debit (Q1 dan Q2), serta untuk tiga interval waktu (5, 10, 15 menit). Perbandingan dilakukan terhadap rata-rata kecepatan aliran dan pola alirannya.

Metode analisis melibatkan perhitungan statistik sederhana seperti nilai rata-rata, deviasi, serta representasi grafis berupa kurva perbandingan. Analisis ini memungkinkan identifikasi perubahan distribusi kecepatan dan pemetaan daerah potensial gerusan. Evaluasi efektivitas deflektor dilakukan dengan membandingkan besaran penurunan kecepatan aliran antar kondisi eksperimental, sesuai dengan pendekatan Schneidewind [20] dan Normandeau, Lajeunesse [21] yang menyarankan kombinasi pengukuran langsung dan visualisasi aliran.

Dengan metodologi ini, hasil penelitian diharapkan dapat merepresentasikan kondisi lapangan secara andal dan untuk mendapatkan gambaran lengkap distribusi kecepatan di sekitar pilar.

Desain model deflektor memperhatikan prinsip kesetaraan geometrik dan kesamaan hidraulik sebagaimana disarankan oleh [20]. Material berpori yang digunakan dirancang untuk mereplikasi hambatan dan penyebaran aliran seperti di sungai alami, sementara keberadaan tulangan memberikan stabilitas struktural terhadap aliran deras.

3. Hasil

Hasil dari eksperimen laboratorium yang dilakukan untuk menilai pengaruh kecepatan aliran terhadap efektivitas deflektor berbentuk silinder pori bertulang di sekitar pilar jembatan. Analisis disusun berdasarkan dua skenario debit (Q1 dan Q2), masing-masing untuk kondisi tanpa dan dengan deflektor, serta pada tiga interval waktu (5, 10, dan 15 menit).

3.1 Kecepatan Aliran Tanpa Deflektor

Pada kondisi tanpa deflektor, kecepatan aliran di sekitar pilar menunjukkan nilai yang relatif tinggi dan fluktuatif, mencerminkan pola aliran yang tidak terkontrol. Tabel dan grafik menunjukkan bahwa peningkatan debit berbanding lurus dengan peningkatan kecepatan aliran. Hasil ini konsisten dengan temuan Harasti, Gilja [4] dan Zhang, Wang [7] yang menunjukkan bahwa meningkatnya debit memperkuat tegangan geser di dasar sungai dan meningkatkan potensi erosi di sekitar pilar. Selain itu, formasi pusaran seperti horseshoe vortex dan wake flow diamati secara visual selama eksperimen, yang menunjukkan pola turbulensi khas pada pilar tanpa perlindungan [22,23].

Tabel 1 Kecepatan Aliran Pada Pilar Q 1

Pilar Q 1			
Titik Pengukuran	5 Menit	10 Menit	15 Menit
Kecepatan Rata-Rata (v)/(m/dtk)			
P1	0,633	0,633	0,633
P2	0,567	0,667	0,567
P3	0,633	0,600	0,600
P4	0,600	0,567	0,600
P5	0,600	0,700	0,667
P6	0,667	0,600	0,633
P7	0,600	0,600	0,633
P8	0,667	0,633	0,633
P9	0,667	0,667	0,633
P10	0,650	0,650	0,600
P11	0,533	0,567	0,533
P12	0,567	0,600	0,567
P13	0,600	0,600	0,600
P14	0,667	0,667	0,633
P15	0,633	0,633	0,600

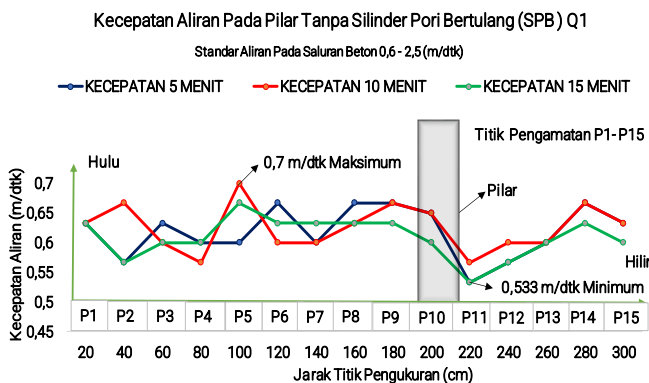
Tabel 1 menyajikan hasil pengukuran kecepatan aliran pada pilar tanpa deflektor (Q1). Berdasarkan tabel dilakukan pengukuran kecepatan aliran (V) pada beberapa titik pengamatan (station) Pada Q 1 untuk 5 menit titik 1 ujung aliaran 0,633 dan titik 8 tengah 0,667 dan titik 15 ujung aliran 0,633 sehingga rata ratanya 0,619. Pada Q 1 untuk 10 menit titik 1 ujung aliaran 0,633 dan titik 8 tengah 0,633 dan titik 15 ujung aliran 0,633 sehingga rata ratanya 0,626. Pada Q 1 untuk 15 menit titik 1 ujung aliaran 0,633 dan titik 8 tengah 0,633 dan titik 15 ujung aliran 0,6 sehingga kecepatan rata ratanya 0,609. kecepatan aliran rata rata waktu 5 sampai 15 menit 0,618 m/dtk.

Tabel 2 Kedalaman Aliran Pada Pilar Q 1

Pilar Q 1			
Titik Pengukuran	5 Menit	10 Menit	15 Menit
Kedalaman Rata-Rata (h)/(m)			
P1	0,040	0,033	0,030
P2	0,040	0,033	0,028
P3	0,038	0,032	0,032
P4	0,037	0,035	0,032
P5	0,038	0,037	0,033
P6	0,033	0,033	0,030

Pilar Q 1			
Titik Pengukuran	5 Menit	10 Menit	15 Menit
Kedalaman Rata-Rata (h)/(m)			
P7	0,035	0,028	0,028
P8	0,035	0,030	0,030
P9	0,035	0,030	0,028
P10	0,040	0,033	0,030
P11	0,035	0,030	0,028
P12	0,040	0,040	0,035
P13	0,037	0,035	0,035
P14	0,038	0,030	0,030
P15	0,035	0,032	0,028

Tabel 2 menyajikan hasil pengukuran kedalaman saat berlangsungnya pengaliran agar dapat mengetahui besarnya pengaruh kecepatan terhadap kedalaman aliran pada pilar Q1 pada menit ke-1, 10, dan 15. Pengukuran ini dilakukan untuk mengetahui perubahan kedalaman aliran selama proses pengaliran berlangsung, nilai kedalaman aliran pada setiap titik pengukuran menunjukkan variasi yang relatif kecil, dengan kedalaman rata-rata berada pada kisaran 0,03–0,04 m. Hal ini menunjukkan bahwa aliran pada kondisi Q1 cenderung stabil meskipun terjadi perubahan kecepatan aliran seiring bertambahnya waktu.



Gambar 5 Kecepatan Aliran Tanpa D

Gambar 5 disimpulkan grafik ini menggambarkan perbandingan kecepatan aliran pada pilar tanpa deflektor (Q1) untuk waktu pengamatan 5 menit, 10 menit, dan 15 menit. Secara visual, grafik menunjukkan bahwa kecepatan aliran paling tinggi terjadi pada menit ke 10 dengan kecepatan 0,7 m/dtk, dan untuk kecepatan terendah terlihat pada menit ke 15 dengan kecepatan 0,533 m/dtk, khususnya pada beberapa titik setelah pilar.

Tabel 3 Kecepatan Aliran Pada Pilar Q 2

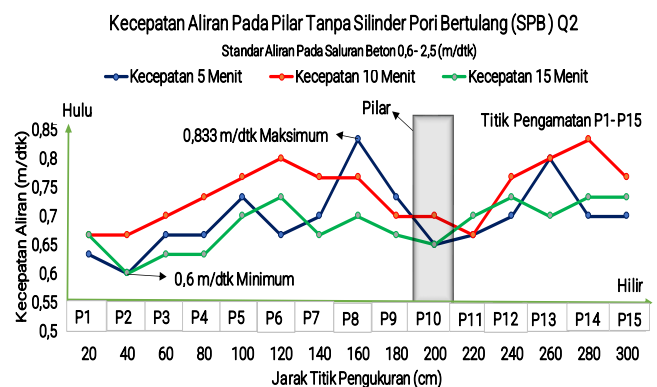
Pilar Q 2			
Titik Pengukuran	5 Menit	10 Menit	15 Menit
Kecepatan Rata-Rata (v)/(m/dtk)			
P1	0,667	0,633	0,733
P2	0,667	0,600	0,700
P3	0,633	0,600	0,700
P4	0,633	0,533	0,633
P5	0,633	0,533	0,633
P6	0,633	0,500	0,633
P7	0,533	0,433	0,567
P8	0,467	0,400	0,500
P9	0,467	0,333	0,433
P10	0,450	0,300	0,400
P11	0,333	0,233	0,333
P12	0,300	0,200	0,300
P13	0,267	0,167	0,267
P14	0,267	0,167	0,267
P15	0,267	0,133	0,233

Tabel 3 menyajikan hasil pengukuran kecepatan aliran pada pilar tanpa deflektor (Q2) untuk waktu pengamatan 5 menit, 10 menit, dan 15 menit. Berdasarkan tabel dilakukan pengukuran kecepatan aliran (V) pada beberapa titik pengamatan (station) Pada Q 2 untuk 5 menit titik 1 ujung aliaran 0,633 dan titik 8 tengah 0,883 dan titik 15 ujung aliran 0,7 sehingga rata ratanya 0,697. Pada Q 2 untuk 10 menit titik 1 ujung aliaran 0,667 dan titik 8 tengah 0,767 dan titik 15 ujung aliran 0,767 sehingga rata ratanya 0,740. Pada Q 2 untuk 15 menit titik 1 ujung aliaran 0,667 dan titik 8 tengah 0,7 dan titik 15 ujung aliran 0,733 sehingga kecepatan rata ratanya 0,683. kecepatan aliran rata rata waktu 5 sampai 15 menit 0,707 m/dtk.

Tabel 4 Kedalaman Aliran Pada Pilar Q 2

Pilar Q 2			
Titik Pengukuran	5 Menit	10 Menit	15 Menit
Kedalaman Rata-Rata (h)/(m)			
P1	0,045	0,045	0,040
P2	0,043	0,045	0,042
P3	0,045	0,045	0,042
P4	0,045	0,045	0,042
P5	0,047	0,043	0,040
P6	0,043	0,042	0,038
P7	0,044	0,040	0,038
P8	0,043	0,040	0,038
P9	0,043	0,037	0,035
P10	0,040	0,038	0,038
P11	0,041	0,038	0,033
P12	0,051	0,045	0,043
P13	0,052	0,048	0,050
P14	0,042	0,043	0,042
P15	0,045	0,042	0,038

Tabel 4 menyajikan hasil pengukuran kedalaman saat berlangsungnya pengaliran agar dapat mengetahui besarnya pengaruh kecepatan terhadap kedalaman aliran pada pilar Q1 pada menit ke-1, 10, dan 15. Pengukuran ini dilakukan untuk mengetahui perubahan kedalaman aliran selama proses pengaliran berlangsung, nilai kedalaman aliran pada setiap titik pengukuran menunjukkan variasi yang relatif kecil, dengan kedalaman rata-rata berada pada kisaran 0,03–0,04 m. Hal ini menunjukkan bahwa aliran pada kondisi Q2 cenderung stabil meskipun terjadi perubahan kecepatan aliran seiring bertambahnya waktu.



Gambar 6 Kecepatan Aliran Tanpa Deflektor Q 2

Gambar 6 Grafik ini menggambarkan perbandingan kecepatan aliran pada pilar tanpa deflektor (Q2) untuk waktu pengamatan 5 menit, 10 menit, dan 15 menit. Secara visual, grafik menunjukkan bahwa kecepatan aliran paling

tinggi terjadi pada menit ke 5 dengan kecepatan 0,833 m/dtk, sementara kecepatan terendah terlihat pada menit ke 15 dengan kecepatan 0,6 m/dtk, khususnya pada beberapa titik setelah pilar. Penyajian dalam bentuk grafik membuat perbedaan dan fluktuasi kecepatan aliran antar waktu pengamatan terlihat lebih jelas dibandingkan data tabel.

3.2 Flow Velocity with Reinforced Porous Cylinder Deflector (Q1 and Q2)

Pemasangan deflektor berbentuk silinder pori bertulang secara signifikan menurunkan kecepatan aliran di sekitar pilar. Hasil ini sejalan dengan studi oleh Ahmadi [24], yang menunjukkan bahwa struktur berpori dapat mengurangi Reynolds Shear Stress (RSS) dan menghambat pembentukan gerusan lokal. Porositas deflektor memungkinkan sebagian aliran menembus dan mengalami disipasi energi, sehingga turbulensi pun berkurang [25]. Pola aliran yang lebih stabil dan melambat ini membantu mencegah pembentukan lubang erosi di sekitar dasar pilar. Penting dalam menciptakan hubungan langsung dengan alam sekitar dasar pilar.

Tabel 5 Kecepatan Aliran Pada Deflektor Q 1

Pilar Dan Silinder pori Beertulang SPB Q 1			
Titik Pengukuran	5 Menit	10 Menit	15 Menit
Kecepatan Rata-Rata (v)/(m/dtk)			
P1	0,633	0,633	0,633
P2	0,567	0,667	0,567
P3	0,633	0,600	0,600
P4	0,600	0,567	0,600
P5	0,600	0,700	0,667
P6	0,667	0,600	0,633
P7	0,600	0,600	0,633
P8	0,667	0,633	0,633
P9	0,667	0,667	0,633
P10	0,650	0,650	0,600
P11	0,533	0,567	0,533
P12	0,567	0,600	0,567
P13	0,600	0,600	0,600
P14	0,667	0,667	0,633
P15	0,633	0,633	0,600

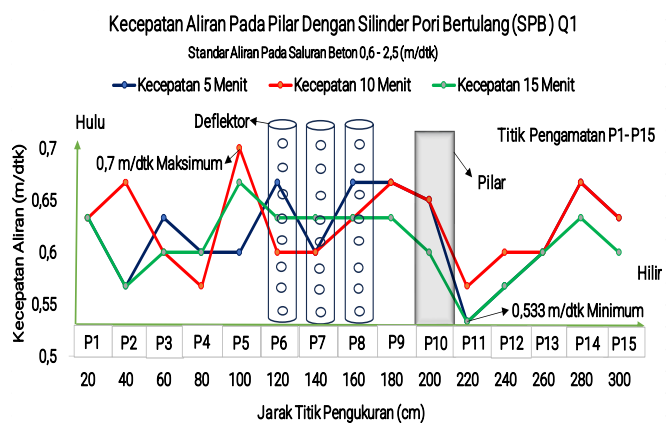
Tabel 5 Tabel ini menampilkan hasil pengukuran kecepatan aliran pada pilar dengan deflektor (Q1). Berdasarkan tabel dilakukan pengukuran kecepatan aliran (V) pada beberapa titik pengamatan (station) Pada Q 1 untuk 5 menit titik 1 ujung aliaran 0,633 dan titik 8 tengah 0,667 dan titik 15 ujung aliran 0,633. Pada Q 1 untuk 10 menit titik 1 ujung aliaran 0,633 dan titik 8 tengah 0,633 dan titik 15 ujung aliran 0,633. Pada Q 1 untuk 15 menit titik 1 ujung aliaran 0,633 dan titik 8 tengah 0,633 dan titik 15 ujung aliran 0,600.

Tabel 6 Kedalaman Aliran Pada Deflektor Q 1

Pilar Dan Silinder pori Beertulang SPB Q 1			
Titik Pengukuran	5 Menit	10 Menit	15 Menit
Kedalaman Rata-Rata (h)/(m)			
P1	0,040	0,033	0,030
P2	0,040	0,033	0,028
P3	0,038	0,032	0,032
P4	0,037	0,035	0,032
P5	0,038	0,037	0,033
P6	0,033	0,033	0,030
P7	0,035	0,028	0,028
P8	0,035	0,030	0,030
P9	0,035	0,030	0,028
P10	0,040	0,033	0,030
P11	0,035	0,030	0,028

P12	0,040	0,040	0,035
P13	0,037	0,035	0,035
P14	0,038	0,030	0,030
P15	0,035	0,032	0,028

Tabel 6 menyajikan hasil pengukuran kedalaman saat berlangsungnya pengaliran agar dapat mengetahui besarnya pengaruh kecepatan terhadap kedalaman aliran pada pilar Q1 pada menit ke-1, 10, dan 15. Pengukuran ini dilakukan untuk mengetahui perubahan kedalaman aliran selama proses pengaliran berlangsung, nilai kedalaman aliran pada setiap titik pengukuran menunjukkan variasi yang relatif kecil, dengan kedalaman rata-rata berada pada kisaran 0,03–0,04 m. Hal ini menunjukkan bahwa aliran pada kondisi Q1 cenderung stabil meskipun terjadi perubahan kecepatan aliran seiring bertambahnya waktu.



Gambar 7 Kecepatan Aliran Dengan Deflektor Q 1

Gambar 7 Grafik ini menggambarkan perbandingan kecepatan aliran dilakukan pengukuran kecepatan aliran (V) pada beberapa titik pengamatan (station) Grafik ini memperlihatkan perbandingan kecepatan aliran pada pilar dengan deflektor (Q1) untuk waktu pengamatan 5 menit, 10 menit, dan 15 menit. Berdasarkan grafik, kecepatan aliran tertinggi terlihat pada menit ke 10 dengan kecepatan 0,7 m/dtk, sedangkan kecepatan terendah terjadi pada menit ke-15 dengan kecepatan 0,533 m/dtk.

Tabel 7 Kecepatan Aliran Dengan Deflektor Q 2

Pilar Dan Silinder pori Beertulang SPB Q 2			
Titik Pengukuran	5 Menit	10 Menit	15 Menit
Kecepatan Rata-Rata (v)/(m/dtk)			
P1	0,667	0,633	0,733
P2	0,667	0,600	0,700
P3	0,633	0,600	0,700
P4	0,633	0,533	0,633
P5	0,633	0,533	0,633
P6	0,633	0,500	0,633
P7	0,533	0,433	0,567
P8	0,467	0,400	0,500
P9	0,467	0,333	0,433
P10	0,450	0,300	0,400
P11	0,333	0,233	0,333
P12	0,300	0,200	0,300
P13	0,267	0,167	0,267
P14	0,267	0,167	0,267
P15	0,267	0,133	0,233

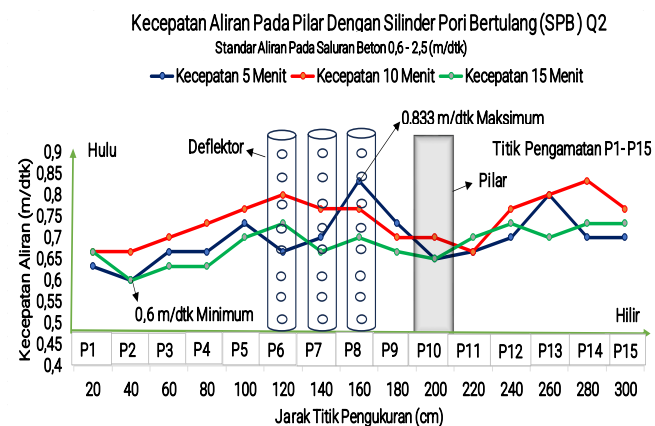
Tabel 7 Tabel ini menampilkan hasil pengukuran kecepatan aliran pada pilar dengan deflektor (Q2). Berdasarkan tabel dilakukan pengukuran kecepatan aliran (V) pada beberapa titik pengamatan (station) Pada Q 2 untuk

5 menit titik 1 ujung aliaran 0,667 dan titik 8 tengah 0,467 dan titik 15 ujung aliran 0,267 sehingga rata ratanya 0,481. Pada Q 2 untuk 10 menit titik 1 ujung aliaran 0,633 dan titik 8 tengah 0,400 dan titik 15 ujung aliran 0,233 sehingga rata ratanya 0,412. Pada Q 2 untuk 15 menit titik 1 ujung aliaran 0,733 dan titik 8 tengah 0,5 dan titik 15 ujung aliran 0,233.

Tabel 8 Kedalaman Aliran Pada Deflektor Q 2

Pilar Dan Silinder pori Beertulang SPB Q 2			
Titik Pengukuran	5 Menit	10 Menit	15 Menit
Kedalaman Rata-Rata (h)/(m)			
P1	0,034	0,034	0,039
P2	0,034	0,033	0,038
P3	0,032	0,033	0,038
P4	0,032	0,029	0,034
P5	0,031	0,028	0,033
P6	0,031	0,028	0,033
P7	0,029	0,026	0,031
P8	0,025	0,023	0,028
P9	0,023	0,020	0,025
P10	0,023	0,020	0,025
P11	0,020	0,017	0,022
P12	0,018	0,015	0,020
P13	0,017	0,014	0,019
P14	0,016	0,013	0,018
P15	0,016	0,013	0,018

Tabel 8 menyajikan hasil pengukuran kedalaman saat berlangsungnya pengaliran agar dapat mengetahui besarnya pengaruh kecepatan terhadap kedalaman aliran pada pilar Q1 pada menit ke-1, 10, dan 15. Pengukuran ini dilakukan untuk mengetahui perubahan kedalaman aliran selama proses pengaliran berlangsung, nilai kedalaman aliran pada setiap titik menunjukkan variasi yang relatif kecil, dengan kedalaman rata-rata berada pada kisaran 0,02–0,03 m. Hal ini menunjukkan pengukuran bahwa aliran pada kondisi Q2 cenderung stabil meskipun terjadi perubahan kecepatan aliran seiring bertambahnya waktu



Gambar 8 Kecepatan Aliran Dengan Deflektor Q 2

Gambar 8 Grafik ini menggambarkan perbandingan kecepatan aliran dilakukan pengukuran kecepatan aliran (V) di buat gambar grafik memperlihatkan perbandingan kecepatan aliran pada pilar dengan deflektor (Q1) untuk waktu pengamatan 5 menit, 10 menit, dan 15 menit. Berdasarkan grafik, kecepatan aliran tertinggi terlihat pada menit ke 5 dengan kecepatan 0,833 m/dtk, sedangkan kecepatan terendah terjadi pada menit ke 15 dengan kecepatan 0,6 m/dtk. Secara keseluruhan, grafik ini menegaskan bahwa penggunaan deflektor menghasilkan pola aliran yang lebih stabil, di mana perbedaan kecepatan

antarwaktu pengamatan dapat diamati dengan lebih jelas melalui penyajian grafik.

3.3 Analisis komparatif

Analisis komparatif memperlihatkan perbedaan signifikan antara kondisi tanpa dan dengan deflektor. Secara numerik, terdapat penurunan kecepatan aliran sebesar 36,9% pada Q1 dan 38,2% pada Q2 setelah pemasangan deflektor. Grafik perbandingan menunjukkan bahwa kecepatan tertinggi tanpa deflektor terjadi pada Q2 menit ke-10 (0,833 m/dtk), sedangkan kecepatan tertinggi dengan deflektor hanya 0,633 m/dtk pada kondisi yang sama.

Metode komparatif ini mengikuti pendekatan statistik sederhana seperti perhitungan rata-rata dan analisis tren, sebagaimana disarankan oleh Muhawenimana, Foad [26] dan Gallardo, Hamad and Escobar-Ortiz [27]. Efektivitas deflektor terbukti secara visual dan numerik dalam menurunkan kecepatan serta mengurangi potensi gerusan.

3.4. Observasi Kecepatan Dan Potensi Gerusan

Selama eksperimen, pola aliran di sekitar pilar diamati mengalami perubahan yang mencolok setelah pemasangan deflektor. Tanpa deflektor, aliran menunjukkan pola konvergen yang kuat ke arah pilar, membentuk pusaran yang dalam dan area wake yang luas di bagian hilir. Pola ini menimbulkan lubang gerusan di dasar saluran.

Sebaliknya, setelah deflektor dipasang, aliran menjadi lebih terdistribusi, dan arah arus berubah ke sisi deflektor. Ini mengurangi intensitas pusaran dan memperkecil zona turbulen di sekitar pilar. Visualisasi aliran menunjukkan sedimentasi yang lebih stabil di sekitar pilar yang dilindungi, mengindikasikan perlambatan aliran dan stabilisasi dasar sungai [28,29].

Teknik visualisasi aliran idealnya menggunakan metode seperti Particle Image Velocimetry (PIV) dan Laser Doppler Anemometry (LDA), namun pada eksperimen ini pengamatan dilakukan secara langsung dengan pencatatan kecepatan di titik-titik pengamatan. Studi numerik sebelumnya [2,30] mendukung temuan bahwa deflektor dapat mengurangi intensitas vortex dan memperbaiki pola aliran.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa deflektor silinder pori bertulang mampu menurunkan kecepatan aliran, mengubah pola arus menjadi lebih terkendali, dan secara signifikan menekan potensi gerusan di sekitar pilar jembatan.

4. Pembahasan

Pembahasan ini dikembangkan secara komprehensif dengan menjadikan temuan empiris penelitian sebagai dasar utama, kemudian diintegrasikan secara kritis dengan pernyataan literatur dan hasil-hasil penelitian terdahulu yang relevan di bidang hidraulika sungai dan perlindungan pilar jembatan. Fokus utama pembahasan diarahkan pada peran deflektor berbentuk silinder pori bertulang dalam memengaruhi struktur aliran, intensitas turbulensi, distribusi tegangan geser, dinamika sedimen, serta implikasinya terhadap pengurangan gerusan lokal (*local scouring*) di sekitar pilar jembatan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemasangan deflektor silinder pori bertulang memberikan pengaruh yang signifikan terhadap penurunan kecepatan aliran di

sekitar pilar. Secara kuantitatif, kecepatan aliran rata-rata pada debit Q_1 menurun dari 0,618 m/dtk menjadi 0,39 m/dtk, sedangkan pada debit Q_2 berkurang dari 0,707 m/dtk menjadi 0,437 m/dtk. Penurunan kecepatan ini menjadi indikator penting berkurangnya energi kinetik aliran yang bekerja langsung pada dasar sungai dan fondasi pilar. Literatur hidraulika secara konsisten menyatakan bahwa besarnya kecepatan aliran berbanding lurus dengan intensitas gerusan lokal, karena kecepatan tinggi memicu peningkatan tegangan geser dan pembentukan struktur turbulen yang agresif di sekitar pilar [4,5].

Secara teoritis, keberadaan deflektor silinder pori bertulang memengaruhi struktur aliran turbulen, khususnya pembentukan horseshoe vortex dan wake vortex yang selama ini dikenal sebagai mekanisme utama penyebab gerusan lokal. Tranmer, Ji [31], Li, Chen [32], dan Song, Wang [33] menegaskan bahwa deflektor berpori mampu mengganggu interaksi vorteks di sekitar pilar dengan cara mengubah jalur aliran utama dan meningkatkan keseragaman distribusi kecepatan. Temuan penelitian ini sejalan dengan pernyataan tersebut, di mana pola aliran yang terbentuk setelah pemasangan deflektor menjadi lebih stabil dan terkontrol, disertai dengan berkurangnya fluktuasi kecepatan di zona kritis sekitar pilar.

Pengaruh deflektor terhadap reduksi turbulensi juga berkaitan erat dengan mekanisme disipasi energi yang terjadi akibat karakteristik porositas struktur. Struktur berpori memungkinkan sebagian aliran menembus deflektor dan kehilangan energi secara bertahap, sehingga intensitas turbulensi menurun sebelum aliran mencapai pilar. Persi, Meninno [25] menunjukkan bahwa mekanisme ini berkontribusi terhadap penurunan Reynolds Shear Stress (RSS), yang secara langsung berkaitan dengan potensi erosi dasar sungai. Dengan demikian, hasil eksperimen ini memperkuat pandangan bahwa deflektor silinder pori bertulang tidak hanya berfungsi sebagai penghalang fisik, tetapi juga sebagai elemen pengatur aliran yang efektif.

Jika dibandingkan dengan metode perlindungan konvensional seperti riprap, collar, dan sacrificial piles, deflektor silinder pori bertulang menunjukkan keunggulan tertentu dalam memodifikasi pola aliran dan dinamika sedimen. Qi, Tian and Zhang [28] serta Guragain and Tanaka [3] menyatakan bahwa meskipun collar dan sacrificial piles mampu mengurangi kedalaman gerusan, efektivitasnya sangat bergantung pada kondisi aliran dan konfigurasi geometrik. Al-Jubouri and Ray [34] menambahkan bahwa metode konvensional cenderung bekerja secara lokal dan pasif, sedangkan deflektor berpori memiliki kemampuan aktif dalam mengarahkan ulang aliran dan sedimen. Hasil penelitian ini mendukung pernyataan tersebut, di mana penurunan kecepatan dan stabilisasi aliran terjadi secara konsisten pada berbagai debit.

Aspek geometri deflektor juga memainkan peran penting dalam menentukan efektivitas pengendalian gerusan. Literatur menunjukkan bahwa parameter seperti porositas, diameter, jarak, dan orientasi deflektor sangat memengaruhi distribusi tegangan geser dan pola transport sedimen di sekitar fondasi jembatan. Allam, Shamaa and Zidan [35] dan Zhang, Wang and Duan [36] menyatakan bahwa tingkat porositas yang lebih tinggi memungkinkan aliran melewati struktur dengan hambatan bertahap, sehingga menurunkan kecepatan lokal dan tegangan geser di dasar pilar. Hal ini

relevan dengan hasil penelitian ini, di mana deflektor berpori menghasilkan penurunan kecepatan yang signifikan tanpa menimbulkan turbulensi sekunder yang merugikan.

Selain porositas, diameter deflektor juga berpengaruh terhadap luas zona perlindungan yang terbentuk. Kadono, Kato [37] serta Bingtao, Wang [38] menunjukkan bahwa diameter yang lebih besar cenderung memperluas daerah pengaruh deflektor, tetapi juga berpotensi meningkatkan gangguan aliran jika tidak dirancang secara proporsional. Dalam penelitian ini, dimensi deflektor dirancang berdasarkan prinsip keseimbangan geometrik, sehingga mampu menyeimbangkan antara efektivitas perlindungan dan kestabilan aliran. Sementara itu, jarak antar deflektor dan orientasinya terhadap arah aliran utama juga berkontribusi terhadap interaksi medan aliran dan potensi pengendapan sedimen di bagian hilir [28].

Dari perspektif dinamika sedimen, penurunan kecepatan aliran yang teramati dalam penelitian ini berimplikasi langsung pada peningkatan stabilitas dasar sungai. Panici and Kripakaran [15] menegaskan bahwa struktur berpori mampu memodifikasi lintasan sedimen dengan mengurangi kapasitas angkut aliran, sehingga mendorong terjadinya deposisi di zona terlindungi. Observasi selama eksperimen menunjukkan bahwa setelah pemasangan deflektor, distribusi aliran di sekitar pilar menjadi lebih merata dan zona turbulensi tinggi berkurang, yang mengindikasikan penurunan potensi erosi dasar.

Dari sisi implementasi praktis, deflektor silinder pori bertulang memiliki nilai aplikatif yang tinggi dalam konstruksi dan rehabilitasi jembatan. Penurunan laju gerusan lokal meningkatkan stabilitas fondasi dan ketahanan struktur terhadap fluktuasi debit musiman maupun kejadian banjir ekstrem. Zhang, Wang [7] mencatat bahwa penerapan deflektor dapat mengurangi kebutuhan penguatan pilar secara berkala, sehingga berdampak pada efisiensi biaya pemeliharaan dan perpanjangan umur layanan jembatan. Temuan ini selaras dengan pandangan Harasti, Gilja [4] yang menekankan pentingnya solusi perlindungan yang efektif sekaligus ekonomis.

Namun demikian, kinerja jangka panjang deflektor berpori juga perlu mendapat perhatian khusus. Allam, Shamaa and Zidan [35] dan Deng, Yang and Yee [39] mengingatkan bahwa akumulasi sedimen pada pori-pori deflektor dapat mengurangi efektivitasnya, sehingga diperlukan strategi pemantauan dan pemeliharaan berkala. Selain itu, Chen, Liu [40] serta Kadono, Kato [37] menyoroti potensi degradasi material akibat gaya erosif jangka panjang, yang menuntut evaluasi periodik terhadap integritas struktural deflektor.

Wang, Hou [2] dan Hu, Shen [41] menekankan bahwa keberhasilan penerapan deflektor berpori sangat bergantung pada perencanaan terpadu yang mengombinasikan desain hidraulik yang tepat dengan manajemen pemeliharaan jangka panjang. Dalam konteks ini, hasil penelitian ini memberikan dasar empiris yang kuat untuk mendukung pengembangan pedoman desain dan strategi pengelolaan deflektor silinder pori bertulang di lapangan.

Penelitian ini juga memberikan kontribusi penting bagi pengembangan studi lanjutan, baik secara eksperimental maupun numerik. Data kecepatan aliran dan pola aliran yang diperoleh dapat digunakan sebagai basis validasi

model numerik tiga dimensi yang bertujuan memprediksi kedalaman dan laju gerusan. Al-Jubouri and Ray [42] merekomendasikan integrasi data eksperimen dari berbagai kondisi hidrodinamik untuk meningkatkan akurasi model prediktif. Dengan demikian, hasil penelitian ini dapat memperkaya basis data yang diperlukan dalam perencanaan jembatan yang lebih aman dan berkelanjutan.

Selain itu, peluang eksplorasi lebih lanjut terbuka melalui pengembangan variasi bentuk dan konfigurasi deflektor. Sahu, Sethy and Naik [43] menunjukkan bahwa geometri pilar dan sudut pemasangan deflektor sangat memengaruhi efisiensi pengendalian gerusan. Integrasi deflektor berpori dengan teknologi pemantauan modern, seperti sistem sonar dan sensor serat optik yang dikembangkan oleh Buka-Vaivade, Nicoletti and Gara [44], juga berpotensi meningkatkan adaptabilitas sistem perlindungan terhadap kondisi ekstrem dan perubahan morfologi dasar sungai secara real-time.

Secara keseluruhan, pembahasan ini menegaskan bahwa deflektor silinder pori bertulang merupakan solusi yang adaptif, efektif, dan berpotensi diterapkan secara luas dalam praktik teknik sipil. Dengan kemampuannya dalam menurunkan kecepatan aliran, memodifikasi struktur turbulensi, serta menstabilkan dinamika sedimen, deflektor ini mendukung konservasi dasar sungai, efisiensi biaya pemeliharaan, dan peningkatan keselamatan serta ketahanan infrastruktur jembatan dalam jangka panjang. Integrasi temuan empiris dengan landasan literatur yang kuat menjadikan penelitian ini sebagai kontribusi yang signifikan dalam pengembangan strategi mitigasi gerusan yang berkelanjutan.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian eksperimental yang dilakukan di laboratorium, dapat disimpulkan bahwa pemasangan deflektor berbentuk silinder pori bertulang efektif dalam menurunkan kecepatan aliran di sekitar pilar jembatan. Pada debit Q1, kecepatan aliran rata-rata berkurang dari 0,618 m/dtk menjadi 0,39 m/dtk, sedangkan pada debit Q2 terjadi penurunan dari 0,707 m/dtk menjadi 0,437 m/dtk. Penurunan ini menunjukkan bahwa deflektor mampu memecah dan mendistribusikan aliran secara lebih merata, sehingga mengurangi konsentrasi energi yang berpotensi menyebabkan gerusan lokal. Selain itu, pola aliran yang lebih stabil dan terkendali juga mengindikasikan berkurangnya formasi pusaran destruktif seperti horseshoe vortex dan wake flow. Hasil ini mendukung temuan literatur sebelumnya dan memperkuat justifikasi penggunaan deflektor berpori sebagai solusi proteksi struktural. Dengan demikian, penggunaan deflektor ini dapat menjadi strategi mitigasi yang adaptif, efisien, dan layak diterapkan dalam desain dan rehabilitasi infrastruktur jembatan di lingkungan sungai dengan dinamika aliran tinggi.

Daftar Pustaka

- [1] Lee FZ, Lai JS, Lin YB, Chang KC. Monitoring and Simulation of Bridge Pier Scour and Deposition Processes in Flood Events. 2024.
- [2] Wang J, Hou Z, Sun H, Bi-he F, Sui J, Karney B. Local Scour Around a Bridge Pier Under Ice-Jammed Flow Condition – An Experimental Study. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2021;69(3):275-87.
- [3] Guragain S, Tanaka N. An Experimental Study on the Effect of Distance and Sheltering Area of a Group of Linearly Arranged Sacrificial Piles on Reducing Local Scour Around a Circular Bridge Pier Under Clear-Water Conditions. *Fluids*. 2024;9(2):35.
- [4] Harasti A, Gilja G, Potočki K, Lacko M. Scour at Bridge Piers Protected by the Riprap Sloping Structure: A Review. *Water*. 2021;13(24):3606.
- [5] Huy MQ. An Overview: Modern Countermeasures Against Local Scour at Bridge Piers—Applicability in Vietnam. 2021:527-35.
- [6] Lee W-L, Lu C-W, Huang C-K. Application of a Single Porous Basket as a Pier Scour Countermeasure. *Water*. 2021;13(21):3052.
- [7] Zhang Y, Wang J, Zhou Q, Cai Y, Tang W. The Investigation of Local Scour Around Bridge Piers With the Protection of a Quasi-Stumps Group. *Water*. 2023;15(15):2858.
- [8] Vahdati VJ, Ahmadi A, Abedini A, Heidarpour M. Evaluation of the Simultaneous Combination of Bed Sill and Sacrificial Piles in the Reduction of Local Scour Depth Around the Bridge Pier and Three-Dimensional Analysis of Turbulent Flow Structure Around Them. 2023.
- [9] Vahdati VJ, Ahmadi A, Abedini A, Heidarpour M. Efficacy of the Combined Use of Bed Sill and Sacrificial Piles to Control Local Scour Around Circular Bridge Piers. *Shock and Vibration*. 2024;2024(1).
- [10] Xu Q, Xie F. Discrete Analysis of Local Scour Morphology of Bridge Piers Affected by Sediment Storage Dam. *Water*. 2023;15(11):2080.
- [11] Al-Jubouri M, Ray RP, Abbas EH. Sensitivity Analysis and Optimization of Pier Shape Scour Prediction Using HEC-RAS. *Pollack Periodica*. 2025;20(2):8-15.
- [12] Helmi AM, Shehata AH. Three-Dimensional Numerical Investigations of the Flow Pattern and Evolution of the Horseshoe Vortex at a Circular Pier During the Development of a Scour Hole. *Applied Sciences*. 2021;11(15):6898.
- [13] Nezhadian DMA, Hamidifar H. Effects of Floating Debris on Flow Characteristics Around Slotted Bridge Piers: A Numerical Simulation. *Water*. 2023;16(1):90.
- [14] Zhang Y, Menghao Z, Jian S, Wang F, Songping L. Experimental and Numerical Investigations of Scours Around a Rectangular Pile Cap Using a Horseshoe-Shaped Collar. *Aqua - Water Infrastructure Ecosystems and Society*. 2025;74(4):321-34.
- [15] Panici D, Kripakaran P. Characterizing the Importance of Porosity of Large Woody Debris Accumulations at Single Bridge Piers on Localized Scour. *Water Resources Research*. 2023;59(9).
- [16] Sharif MN, Ghani U, Pasha GA. Impact of Shape, Spacing, and Number of Sacrificial Piles on Clear Water Local Scour Around a Compound Bridge Pier. 2024.
- [17] Abdulwahd AK, Maatooq JS. Experimental Investigation of Local Scour Under Two Oblong Piers of a Bridge Crossing a Sharp Bend River. *Journal of Water and Land Development*. 2023:129-35.
- [18] Liu J, Li Z, Huang H, Lin W, Sun Z, Chen F. Three-Dimensional Turbulent Simulation of Bivariate Normal Distribution Protection Device. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024;12(4):602.
- [19] Widyastuti I, Thaha MA, Lopa RT, Hatta MP. Dam-Break Energy of Porous Structure for Scour Countermeasure at Bridge Abutment. *Civil Engineering Journal*. 2022;8(12):3939-51.
- [20] Schneidewind U. Sediment-Water Interfaces as Traps and Sources of Microplastic Fragments and Microfibers—Insights From Stream Flume Experiments. *Acs Es&t Water*. 2025.
- [21] Normandeau A, Lajeunesse P, Ghienne JF, Dietrich P. Detailed Seafloor Imagery of Turbidity Current Bedforms Reveals New Insight Into Fine-Scale Near-Bed Processes. *Geophysical Research Letters*. 2022;49(11).
- [22] Ahmed AA, Ismael A. Comparing the 3D Flow Behavior Around Different Bridge Pier Shapes Using CFD-Fluent: Implications for Reducing Local Scour. *Mathematical Modelling and Engineering Problems*. 2024;11(5):1315-22.
- [23] Azma A, Kiyafar R, Liu Y, Azma M, Zhang D, Cao Z, Li Z. ML and CFD Simulation of Flow Structure Around Tandem Bridge Piers in Pressurized Flow. *Computers Materials & Continua*. 2023;75(1):1711-33.
- [24] Ahmadi R. Hydrodynamic Effects of Porous Baskets on Scour Patterns at Elliptical and Hexagonal Piers. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2025;73(3):230-47.

- [25] Persi E, Meninno S, Petaccia G, Sibilla S, Armanini A. Modeling Large Wood Transport in Semi-Congested Regime With Multiple Entry Points. *Water*. 2022;14(3):421.
- [26] Muhawenimana V, Foad N, Ouro P, Wilson C. Local Scour Patterns Around a Bridge Pier With Cable-Wrapping. *Fluids*. 2022;8(1):3.
- [27] Gallardo K, Hamad KMA, Escobar-Ortiz J. Experimental Analysis of the Effectiveness of Submerged Vanes in Mitigating Local Scour at Quadratic Bridge Piers. *Enfoque Ute*. 2025;16(1):10-6.
- [28] Qi H, Tian W, Zhang H. Modeling Local Scour Around a Cylindrical Pier With Circular Collar With Tilt Angles (Counterclockwise Around the Direction of the Channel Cross-Section) in Clear-Water. *Water*. 2021;13(22):3281.
- [29] Nimbalkar P, Rathod P, Manekar V, Bhalerao A. Scour Model for Circular Compound Bridge Pier. *Water Science & Technology Water Supply*. 2022;22(5):5111-25.
- [30] Bento AM, Viseu T, Pêgo JP, Couto L. Experimental Characterization of the Flow Field Around Oblong Bridge Piers. *Fluids*. 2021;6(11):370.
- [31] Tranmer AW, Ji U, Ahn M, Jung SH, Yager EM. Characterizing Erosion and Deposition in and Around Riparian Vegetation Patches: Complex Flow Hydraulics, Sediment Supply, and Morphodynamic Feedbacks. *Water Resources Research*. 2024;60(2).
- [32] Li M, Chen M, Wu W, Li J, An R. Differences in the Natural Swimming Behavior of *Schizothorax Prenanti* Individual and Schooling in Spatially Heterogeneous Turbulent Flows. *Animals*. 2023;13(6):1025.
- [33] Song F, Wang J, Zhang Z, Cheng T, Li G, Sui J. Local Scour Around Side-by-Side Double Piers in Channel Bends Under Ice-Covered Conditions—An Experimental Study. *Water*. 2023;15(13):2317.
- [34] Al-Jubouri M, Ray RP. A Comparative Study of Local Scour Depth Around Bridge Piers. *Pollack Periodica*. 2023;18(1):100-5.
- [35] Allam AA, Shamaa MT, Zidan AF. Reduction of Local Scour Around Bridge Piers Using Different Countermeasures.(Dept.C). *Mej Mansoura Engineering Journal*. 2021;46(1):1-9.
- [36] Zhang X, Wang T, Duan B. Study on the Effect of Morphological Changes of Bridge Piers on Water Movement Properties. *Water Practice & Technology*. 2021;16(4):1421-33.
- [37] Kadono T, Kato S, Okazaki S, Matsui T, Kajitani Y, Ishizuka M, Yoshida H. Effects of Dynamical Change in Water Level on Local Scouring Around Bridge Piers Based on in-Situ Experiments. *Water*. 2021;13(21):3015.
- [38] Bingtao H, Wang Q, Qi Y, Zhang R. Prediction Model of Local Scour Depth of Bridge Piers Based on LS-SVM. *Journal of Civil Engineering and Urban Planning*. 2023;5(4).
- [39] Deng P, Yang J, Yee T. Deep Learning-Based Flood Detection for Bridge Monitoring Using Accelerometer Data. *Infrastructures*. 2024;9(9):140.
- [40] Chen Z, Liu L, Hu Y, Ye N, Shen X, Wang Y. Experimental on the Protective Performance of Column Bridge Pier Anti-Scouring Device. *E3s Web of Conferences*. 2021;248:01015.
- [41] Hu J, Shen H, Zhang J, Meng Z, Zhang Y, Han W. Influence of Multi-Cross Structures on the Flood Discharge Capacity of Mountain Rivers in the Yellow River Basin. *Water*. 2023;15(15):2719.
- [42] Al-Jubouri M, Ray RP. Hydrodynamic Modeling and Comprehensive Assessment of Pier Scour Depth and Rate Induced by Wood Debris Accumulation. *Hydrology*. 2024;11(4):52.
- [43] Sahu SK, Sethy K, Naik JK. Estimation of Local Scour Depth Around Bridge Pier. *International Journal of Engineering*. 2024;37(11):2181-91.
- [44] Buka-Vaivade K, Nicoletti V, Gara F. Advancing Bridge Resilience: A Review of Monitoring Technologies for Flood-Prone Infrastructure. *Open Research Europe*. 2025;5:26.

