

# Efektivitas Deflektor Silinder Pori Bertulang dalam Mengendalikan Aliran di Sekitar Pilar Jembatan

Aksan Ali<sup>1</sup>, Nenny Karim<sup>\*1</sup>, Andi Makbul Syamsuri<sup>1</sup>, Sahabuddin Latif<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Makassar

<sup>2</sup>Program Studi Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Makassar

## ABSTRAK

Gerusan lokal di sekitar pilar jembatan merupakan salah satu penyebab utama kegagalan struktur dalam sistem hidraulik akibat interaksi kompleks antara aliran turbulen dan elemen fondasi. Penelitian ini menyelidiki pengaruh pemasangan deflektor arus bawah air (Underwater Current Deflector/UCD) berbentuk silinder pori bertulang (SPB) terhadap karakteristik aliran di sekitar pilar jembatan. Eksperimen dilakukan di laboratorium menggunakan model fisik dalam saluran terbuka dengan kondisi debit yang dikendalikan. Kecepatan aliran dan kedalaman air diukur, serta bilangan Froude dan Reynolds dihitung sebelum dan sesudah pemasangan SPB. Hasil penelitian menunjukkan bahwa deflektor secara signifikan menurunkan kecepatan aliran dan mengubah rezim aliran dari kondisi superkritik menjadi subkritik. Transisi ini mengindikasikan penurunan energi hidraulik dan turbulensi, sehingga meminimalkan potensi mobilisasi sedimen dan gerusan lokal. Analisis komparatif menegaskan efektivitas SPB dalam menstabilkan pola aliran dan menurunkan indikator energi aliran. Struktur berpori pada deflektor berperan sebagai peredam energi aliran, menjadikannya alternatif perlindungan hidraulik yang menjanjikan dibandingkan metode struktural konvensional. Meskipun temuan ini signifikan, studi ini juga mengakui keterbatasan model skala laboratorium dalam mereplikasi kondisi sungai alami secara menyeluruh. Oleh karena itu, penelitian lanjutan melalui validasi lapangan dan simulasi numerik sangat dianjurkan. Studi ini memberikan dasar praktis bagi pengembangan deflektor hidraulik untuk perlindungan pilar jembatan.

## ABSTRACT

Local scour around bridge piers is a major cause of structural failure in hydraulic systems due to complex interactions between turbulent flows and foundation elements. This study investigates the effect of installing an underwater current deflector (UCD) in the form of a reinforced pore cylinder (SPB) on flow characteristics around a bridge pier. A laboratory flume experiment was conducted using physical models at controlled discharge conditions. Flow velocity and water depth were measured, and Froude and Reynolds numbers were calculated before and after the installation of the SPB. The results show that the deflector significantly reduces flow velocity and shifts flow regimes from supercritical to subcritical conditions. This transition indicates a reduction in hydraulic energy and turbulence, thus minimizing the potential for sediment mobilization and local scour. Comparative analysis confirmed the effectiveness of the SPB in stabilizing flow patterns and reducing flow energy indicators. The porous structure of the deflector acts as a flow energy dissipator, making it a promising hydraulic protection alternative to traditional structural methods. While the findings are significant, the study acknowledges the limitations of laboratory-scale models in replicating real river conditions. Further research involving field validation and numerical simulations is recommended. This study provides a practical basis for the development of hydraulic deflectors for bridge pier protection.

## ARTICLE HISTORY

Received January 1, 2026

Received in revised form

January 20, 2026

Accepted February 10, 2026

Available online Februari 12, 2026.

## KEYWORDS

Gerusan Lokal, Pilar Jembatan, Deflector Arus Bawah Air, Silinder Pori Bertulang, Bilangan Froude, Stabilitas Aliran.

Local Scour, Bridge Pier, Underwater Current Deflector, Reinforced Pore Cylinder, Froude Number, Flow Stability.

## 1. Pendahuluan

Jembatan merupakan infrastruktur vital yang memiliki peran strategis dalam mendukung konektivitas wilayah, mobilitas masyarakat, serta distribusi logistik dan ekonomi. Stabilitas dan keberlanjutan struktur jembatan sangat ditentukan oleh kondisi elemen struktur bawah, terutama pilar jembatan yang berinteraksi langsung dengan aliran sungai. Salah satu ancaman utama terhadap kestabilan pilar adalah fenomena gerusan lokal (*local scour*), yaitu proses

erosi yang terjadi secara intensif di sekitar fondasi pilar akibat interaksi kompleks antara aliran air dan dasar sungai.

Fenomena gerusan lokal secara umum disebabkan oleh mekanisme hidraulik yang melibatkan distribusi kecepatan aliran, turbulensi, dan pembentukan struktur pusaran (*vortex*) di sekitar pilar. Interaksi antara aliran turbulen dan sedimen menyebabkan partikel dasar terangkat dan membentuk lubang gerusan, dengan intensitas yang dipengaruhi oleh kekuatan pusaran dan tekanan hidraulik di sekitar pilar [1-3]. Penelitian menyebutkan bahwa struktur turbulen seperti pusaran kohesif memainkan peran penting

dalam menentukan kedalaman gerusan karena kemampuannya untuk mempercepat pengangkatan sedimen di sekitar dasar pilar [4,5]. Selain itu, karakteristik aliran seperti distribusi kecepatan dan tingkat turbulensi secara signifikan meningkatkan tegangan geser di sekitar pilar, yang secara langsung meningkatkan potensi terjadinya gerusan [6,7].

Pentingnya memahami dinamika ini menjadi kunci dalam merancang strategi mitigasi gerusan yang efektif. Studi sebelumnya juga menunjukkan bahwa aliran sekunder dan vorteks di belakang pilar memodifikasi pola transportasi sedimen dan mempercepat terjadinya erosi lokal [8,9]. Oleh karena itu, analisis menyeluruh terhadap mekanisme hidraulik ini menjadi penting dalam merancang perlindungan pilar jembatan secara efektif.

Banyak studi eksperimental dan observasi lapangan menyimpulkan bahwa kegagalan struktur jembatan sering kali terkait langsung dengan intensitas gerusan lokal. Gerusan tersebut menyebabkan hilangnya tanah di sekitar fondasi pilar, yang berdampak pada ketidakstabilan atau bahkan runtuhnya struktur ketika mengalami beban hidraulik [10,11]. Faktor utama penyebab gerusan antara lain adalah kecepatan aliran yang tinggi, transportasi sedimen yang masif, serta akumulasi sampah di sekitar pilar [12,13]. Selain itu, geometri desain pilar juga berperan dalam memperparah intensitas gerusan, terutama pada pilar kompleks dengan bentuk tidak beraturan [14,15].

Sebagai respons terhadap permasalahan ini, berbagai metode perlindungan pilar telah dikembangkan. Dua pendekatan umum yang diterapkan adalah pendekatan struktural dan pendekatan hidraulik. Pendekatan struktural seperti penggunaan riprap atau selubung pelindung telah terbukti efektif, namun sering kali menghasilkan redistribusi pola aliran dan potensi gerusan lanjutan di bagian hilir [16,17]. Sebaliknya, pendekatan hidraulik dinilai lebih adaptif karena berfokus pada pengendalian energi dan arah aliran sebelum mencapai pilar.

Metode berbasis pengendalian aliran, seperti pemasangan bed sills, tiang pengorbanan (*sacrificial piles*), dan deflektor arus bawah air (*underwater current deflectors/UCD*), telah menunjukkan hasil signifikan dalam menurunkan kecepatan aliran dan mengurangi tegangan geser di sekitar pilar [10,14]. Salah satu teknik yang mendapat perhatian akhir-akhir ini adalah pengendalian energi aliran melalui alat-alat pengarah aliran yang mampu mengubah pola turbulensi dan distribusi kecepatan. Strategi ini secara efektif mengurangi gaya hidraulik yang bekerja pada dasar sungai dan meningkatkan kestabilan pilar [1,18].

Kemajuan teknologi terkini menunjukkan peningkatan efektivitas perangkat UCD dalam berbagai konfigurasi. Misalnya, penggunaan kabel lilit pada pilar terbukti mampu menurunkan kedalaman gerusan hingga 52% dibandingkan kondisi tanpa perlindungan [19]. Inovasi lain seperti penempatan bed sills dan tiang pengorbanan secara strategis telah terbukti menciptakan zona kecepatan rendah dan meminimalkan kekuatan erosi [10]. Penambahan struktur quasi-stump juga efektif mengarahkan aliran agar mendorong pengendapan sedimen daripada pengikisan [20].

Namun demikian, sebagian besar studi masih berfokus pada hasil akhir berupa kedalaman gerusan tanpa menguraikan perubahan karakteristik aliran secara

menyeluruh. Padahal, pemahaman terhadap parameter seperti bilangan Froude dan bilangan Reynolds sangat penting dalam mengidentifikasi jenis aliran (subkritis, kritis, atau superkritis), serta menilai potensi energi hidraulik yang bekerja di sekitar pilar.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini merumuskan permasalahan: bagaimana pengaruh pemasangan deflektor arus bawah air berbentuk silinder pori bertulang terhadap perubahan karakteristik aliran di sekitar pilar jembatan? Untuk menjawab pertanyaan ini, studi ini bertujuan untuk menganalisis perbedaan karakteristik aliran dilihat dari kecepatan, tinggi muka air, serta nilai bilangan Froude sebelum dan sesudah pemasangan deflektor.

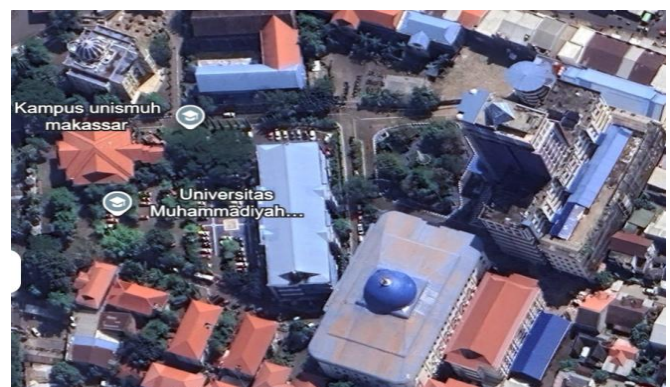
Studi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan metode perlindungan pilar jembatan berbasis pengendalian aliran. Secara khusus, hasil dari penelitian ini dapat memperkaya pemahaman tentang efektivitas deflektor silinder pori bertulang sebagai strategi mitigasi gerusan lokal, serta menjadi dasar rancangan teknis yang lebih efisien dan berkelanjutan dalam konteks rekayasa hidraulik jembatan.

## 2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif melalui metode eksperimen laboratorium untuk menganalisis perubahan karakteristik aliran di sekitar pilar jembatan akibat pemasangan deflektor arus bawah air berbentuk silinder pori bertulang. Eksperimen dilakukan dalam saluran terbuka dengan model fisik berskala kecil, mengikuti prinsip kesetaraan hidraulik untuk memastikan kesesuaian antara fenomena yang diamati pada model dengan kondisi di lapangan. Analisis difokuskan pada parameter kecepatan aliran, tinggi muka air, bilangan Froude, dan bilangan Reynolds sebagai indikator utama karakteristik aliran.

### 2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimental laboratorium yang dilaksanakan di Laboratorium Teknik Sungai II, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Makassar. Objek penelitian adalah model pilar jembatan tunggal yang dipasang di dalam saluran terbuka berbentuk trapesium. Saluran dilengkapi pintu thompson, pompa air, dan bak penampung untuk mengatur debit aliran. Penelitian dimulai pada bulan Mei hingga bulan Agustus 2025 ( $\pm 3$  bulan).



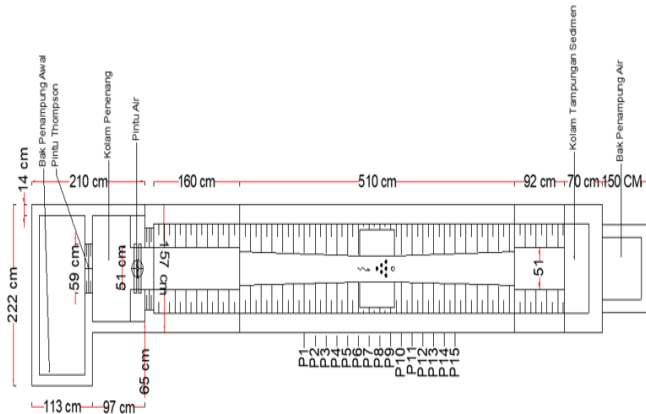
Gambar 1. Lokasi Penelitian

**Gambar 1** Lokasi penelitian ditampilkan pada akhir subbagian ini memberikan ilustrasi visual lokasi Laboratorium Hidraulika Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Makassar, Indonesia. mengenai ruang eksperimen dan konfigurasi fasilitas laboratorium yang digunakan.

## 2.2 Model Saluran

Saluran terbuka yang digunakan yaitu saluran trapesium yang dilengkapi dengan bak air. Model saluran yang digunakan adalah saluran yang terdiri tanah merah, pasir lalu batu, kerikil serta campuran semen yang dilengkapi dengan dinding saluran kaca dengan penampang bentuk trapesium. Bentuk geometris dari saluran adalah saluran lurus dengan dinding permanen, saluran ini memiliki lebar dasar yang bervariasi, pada bagian pertama saluran lebar dasarnya yaitu 0,5 m, pada bagian kedua saluran lebarnya yaitu 0,42 m, sampai ke ujung dinding kaca akrilik lebarnya mengecil hingga 0,32 m, sepanjang dengan dinding kaca akrilik lebarnya tetap 0,32 m, kemudian melebar lagi hingga 0,42 m menuju saluran bagian ketiga, pada bagian ketiga saluran lebar dasarnya yaitu 0,5 m, saluran ini pun memiliki tinggi yang bervariasi, pada bagian pertama saluran tingginya yaitu 0,55 m, pada bagian kedua saluran tingginya yaitu 0,70 m, dan pada bagian ketiga saluran tingginya yaitu 0,55 m. Panjang saluran yaitu 10 m.

**Gambar 2** Model saluran terbuka dengan penampang trapesium ditampilkan setelah uraian ini untuk memperjelas konfigurasi geometri dan arah aliran dalam saluran uji.



**Gambar 2.** Model Saluran Terbuka dengan Penampang Trapesium

## 2.3 Model Pilar

Objek utama penelitian berupa model pilar jembatan tunggal yang ditempatkan di tengah saluran. Pilar berbentuk silinder vertikal dengan diameter 11,5 cm dan tinggi 40 cm, terbuat dari beton yang tahan terhadap tekanan aliran. Penempatan pilar dilakukan pada posisi tetap di tengah saluran untuk meniru kondisi struktur jembatan sesungguhnya yang berada tegak lurus terhadap aliran sungai.

**Gambar 3** Model pilar jembatan disisipkan pada akhir bagian ini sebagai ilustrasi bentuk dan posisi pilar dalam sistem eksperimen.



**Gambar 3.** Model Pilar

## 2.4 Model Deflector

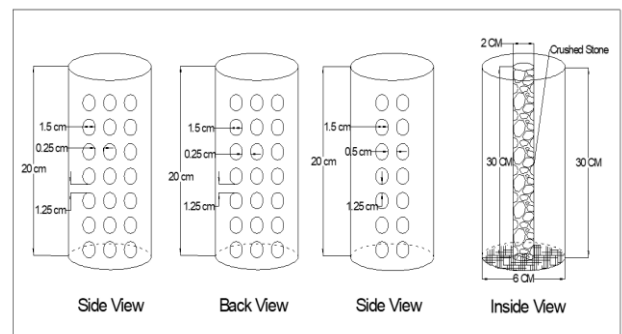
Deflektor arus bawah air yang digunakan dalam penelitian ini berbentuk silinder pori bertulang (SPB), dirancang dengan diameter luar 6 cm dan tinggi 30 cm. Struktur pori dimaksudkan untuk memungkinkan sebagian aliran masuk melalui badan deflektor sehingga menurunkan energi kinetik dan tekanan stagnasi, sedangkan rangka tulangan dari kawat baja ringan memberikan kekuatan struktural terhadap tekanan arus. Deflektor diposisikan di hulu pilar dengan jarak tertentu untuk memodifikasi pola aliran sebelum mencapai pilar.

**Gambar 4** Model deflektor silinder pori bertulang ditampilkan setelah uraian mengenai desain dan fungsi SPB. Selanjutnya, **Gambar 5** menyajikan detail model deflektor dalam autocad

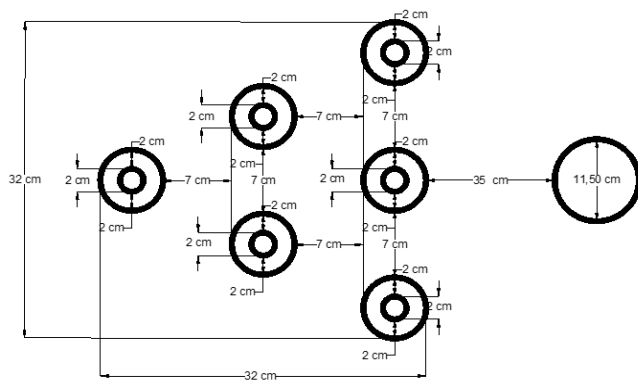
Model deflektor berbentuk silinder pori bertulang diletakkan ditengah saluran **Gambar 6** menampilkan detail dan formasi deflektor silinder pori bertulang **Gambar 7** menunjukkan konfigurasi penempatan SPB relatif terhadap pilar jembatan dalam saluran.



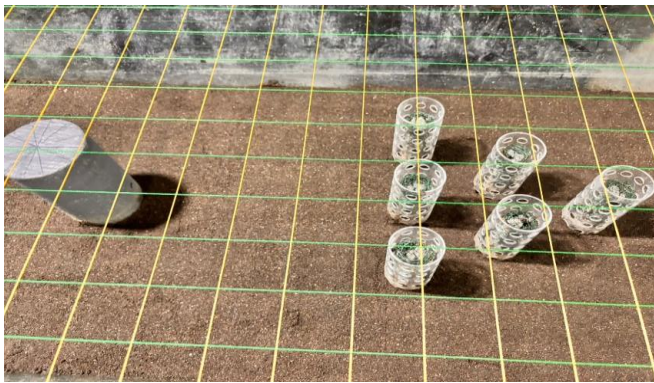
**Gambar 4.** Model Deflector



**Gambar 5.** Detail Model Deflector dalam Autocat



Gambar 6. Detail dan Formasi Deflector



Gambar 7. Formasi Deflector Silinder Pori Bertulang

## 2.5 Prosedur Penelitian Dan Analisis Data

Eksperimen dilakukan dalam dua kondisi utama: (1) tanpa deflektor (kondisi dasar), dan (2) dengan deflektor silinder pori bertulang. Pada setiap kondisi, dilakukan pengamatan terhadap dua variasi debit, yakni Q<sub>1</sub> (debit rendah) dan Q<sub>2</sub> (debit tinggi), dengan pengukuran dilakukan pada interval waktu: menit ke-15. Setiap percobaan diulang untuk memperoleh data yang andal dan akurat.

Data yang dikumpulkan mencakup kecepatan aliran dan tinggi muka air pada beberapa titik pengamatan di sepanjang saluran. Kecepatan aliran diukur menggunakan current meter digital (*flowatch*), sedangkan tinggi muka air diamati dengan penggaris ukur yang dipasang tetap. Analisis dilanjutkan dengan menghitung bilangan Froude. Bilangan Froude dihitung menggunakan rumus:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \times h}}$$

Keterangan :

- $v$  : Kecepatan aliran (m/s)
- $g$  : Percepatan gravitasi (9.81 m/s<sup>2</sup>)
- $h$  : Kedalaman aliran (m)

Bilangan Froude digunakan untuk menentukan jenis aliran: subkritis ( $Fr < 1$ ), kritis ( $Fr = 1$ ), dan superkritis ( $Fr > 1$ ) sebagaimana dijelaskan oleh Wang dkk. [21] dan Ali dkk. [22]. Seluruh data dianalisis secara komparatif untuk mengevaluasi perubahan karakteristik aliran sebelum dan sesudah pemasangan SPB, serta untuk menilai efektivitas

deflektor dalam mengurangi potensi gerusan lokal di sekitar pilar jembatan.

## 3. Hasil

### 3.1 Analisis Karakteristik Aliran

Pada kondisi awal tanpa pemasangan deflektor, aliran di sekitar pilar menunjukkan pola akselerasi pada sisi samping pilar dengan terbentuknya aliran balik di bagian hulu dan wake vortex di bagian hilir. Distribusi kecepatan menunjukkan kecenderungan meningkat seiring waktu pengamatan, terutama pada debit tinggi (Q<sub>2</sub>). Fenomena ini menunjukkan aliran dengan karakteristik superkritis.

Hal ini ditunjukkan oleh nilai bilangan Froude ( $Fr$ ) yang meningkat dari kondisi mendekati kritis ( $Fr \approx 1$ ) menjadi superkritis ( $Fr > 1$ ) pada menit ke-15. Kondisi ini sesuai dengan temuan Baranwal dan Das [15] serta Martin dkk. [23], yang menunjukkan peningkatan Froude secara signifikan pada kondisi debit tinggi tanpa perlindungan struktur.

Setelah pemasangan deflektor SPB, distribusi aliran mengalami perubahan signifikan. Kecepatan aliran di sekitar pilar menurun, dan pola aliran menjadi lebih merata. Pori-pori pada deflektor berfungsi sebagai peredam energi aliran, sementara rangka tulangan menjaga bentuk struktural deflektor terhadap tekanan arus.

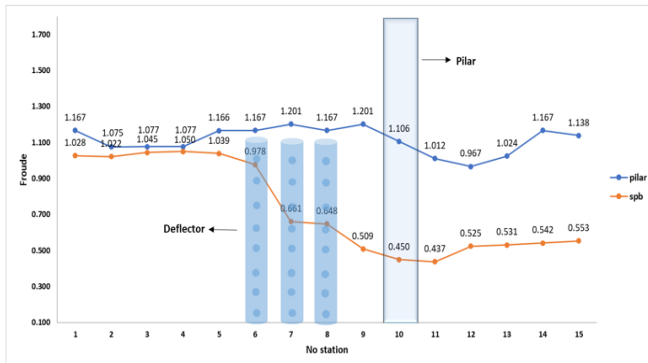
Temuan ini sejalan dengan penelitian oleh Nezhadian dan Hamidifar [1] dan Vahdati dkk. [10], yang menyatakan bahwa deflektor berpori mampu menurunkan intensitas turbulensi dan kecepatan puncak secara signifikan.

Tabel 1. Bilangan Froude Q<sub>1</sub> Pada Pilar

| Pilar                       |                      |
|-----------------------------|----------------------|
| Kecepatan Rata-rata (m/dtk) | Bilangan Froude (Fr) |
| 0.633                       | 1.167                |
| 0.567                       | 1.075                |
| 0.600                       | 1.077                |
| 0.600                       | 1.077                |
| 0.667                       | 1.166                |
| 0.633                       | 1.167                |
| 0.633                       | 1.201                |
| 0.633                       | 1.167                |
| 0.633                       | 1.201                |
| 0.600                       | 1.106                |
| 0.533                       | 1.012                |
| 0.567                       | 0.967                |
| 0.600                       | 1.024                |
| 0.633                       | 1.167                |
| 0.600                       | 1.138                |

Tabel 1. Bilangan Froude Q<sub>1</sub> Pada SPB

| SPB                         |                      |
|-----------------------------|----------------------|
| Kecepatan Rata-rata (m/dtk) | Bilangan Froude (Fr) |
| 0.567                       | 1.028                |
| 0.567                       | 1.022                |
| 0.567                       | 1.045                |
| 0.567                       | 1.050                |
| 0.567                       | 1.039                |
| 0.533                       | 0.978                |
| 0.400                       | 0.661                |
| 0.367                       | 0.648                |
| 0.267                       | 0.509                |
| 0.250                       | 0.450                |
| 0.233                       | 0.437                |
| 0.267                       | 0.525                |
| 0.267                       | 0.531                |
| 0.267                       | 0.542                |
| 0.267                       | 0.553                |



Gambar 8. Grafik hubungan angka froude sebelum dan sesudah pemasangan deflector (Q1)

Berdasarkan Gambar 8 menunjukkan perbandingan sebelum penempatan model deflector dan setelah pemasangan deflector silinder pori bertulang untuk debit (Q1), pada t :15 menit sebelum penempatan deflector pada titik 1 kondisi aliran masih kritis, di titik 2-4 kondisi aliran menjadi sub kritis, dititik 5-15 kondisi aliran semakin meningkat dengan lamanya pengaliran hingga cenderung mencapai super kritis. Sesudah penempatan model deflector untuk debit (Q1), pada t : 15 menit pada awal pengaliran titik 1-5 kecepatan aliran cenderung kritis pada titik 7-15 aliran menurun dan stabil hingga mencapai sub kritis.

Tabel 3. Bilangan Froude Q2 Pada Pilar

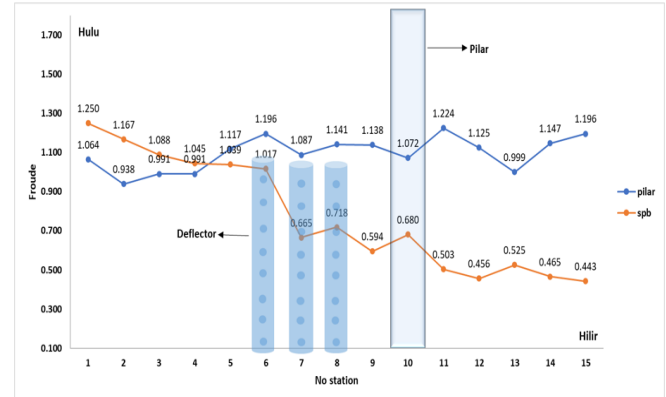
| Pilar                       |                      |
|-----------------------------|----------------------|
| Kecepatan Rata-rata (m/dtk) | Bilangan Froude (Fr) |
| 0.667                       | 1.064                |
| 0.600                       | 0.938                |
| 0.633                       | 0.991                |
| 0.633                       | 0.991                |
| 0.700                       | 1.117                |
| 0.733                       | 1.196                |
| 0.667                       | 1.087                |
| 0.700                       | 1.141                |
| 0.667                       | 1.138                |
| 0.650                       | 1.072                |
| 0.700                       | 1.224                |
| 0.733                       | 1.125                |
| 0.700                       | 0.999                |
| 0.733                       | 1.147                |
| 0.733                       | 1.196                |

Tabel 4. Bilangan Froude Q2 Pada SPB

| SPB                         |                      |
|-----------------------------|----------------------|
| Kecepatan Rata-rata (m/dtk) | Bilangan Froude (Fr) |
| 0.667                       | 1.250                |
| 0.633                       | 1.167                |
| 0.600                       | 1.088                |
| 0.567                       | 1.045                |
| 0.567                       | 1.039                |
| 0.567                       | 1.017                |
| 0.367                       | 0.665                |
| 0.400                       | 0.718                |
| 0.300                       | 0.594                |
| 0.350                       | 0.680                |
| 0.267                       | 0.503                |
| 0.233                       | 0.456                |
| 0.267                       | 0.525                |
| 0.233                       | 0.465                |
| 0.233                       | 0.443                |

Berdasarkan Gambar 9 menunjukkan perbandingan sebelum penempatan model deflector dan setelah pemasangan deflector silinder pori bertulang untuk debit (Q2), pada t :15 menit sebelum penempatan deflector pada

titik 1 kondisi aliran masih kritis, di titik 2-4 kondisi aliran menjadi sub kritis, dititik 5-6 kondisi aliran semakin meningkat dengan lamanya pengaliran hingga mencapai super kritis dititik 7 kembali ke kondisi kritis, dititik 8-15 kecepatan aliran meningkat dengan lamanya pengaliran hingga mencapai super kritis. Sesudah penempatan model deflector untuk debit (Q2), pada t : 15 menit pada awal pengaliran titik 1-6 cenderung super kritis dan kritis, pada titik 7-15 aliran menurun dan stabil hingga mencapai sub kritis.



Gambar 9. Grafik angka froude sebelum dan sesudah pemasangan deflector (Q2)

### 3.2 Analisis Karakteristik Aliran

Analisis komparatif antara dua kondisi memperlihatkan perbedaan nyata dalam karakteristik aliran. Tanpa deflektor, aliran cenderung mengalami percepatan signifikan dengan pola superkritis dan turbulen, memperbesar potensi terjadinya gerusan lokal. Sebaliknya, dengan pemasangan SPB, aliran menjadi lebih stabil dan transisi ke subkritis, menandakan redaman energi aliran yang efektif.

Penurunan Fr di sekitar pilar menegaskan keberhasilan SPB dalam mengendalikan intensitas aliran. Hal ini sesuai dengan laporan oleh Ahmadi [24] dan You dan Tinoco [25] yang menunjukkan bahwa deflektor berpori mengubah distribusi kecepatan dan mengurangi intensitas turbulensi secara signifikan.

Lebih lanjut, hasil ini memperkuat klaim bahwa penggunaan deflektor hidraulik seperti SPB mampu mengubah rezim aliran dari dominan turbulen menjadi lebih terdisipasi, yang secara langsung mengurangi potensi pengangkatan sedimen dan pembentukan lubang gerusan. Dengan demikian, SPB berperan sebagai perlindungan hidraulik efektif bagi pilar jembatan dalam kondisi aliran deras.

## 4. Pembahasan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemasangan deflektor arus bawah air berbentuk silinder pori bertulang (SPB) secara signifikan memodifikasi karakteristik aliran di sekitar pilar jembatan, terutama melalui penurunan bilangan Froude (Fr) dan Reynolds (Re). Temuan ini memiliki implikasi penting dalam konteks dinamika transport sedimen dan mekanisme gerusan lokal. Secara konseptual, perubahan rezim aliran dari superkritis menuju subkritis merupakan faktor kunci dalam mengendalikan intensitas erosi di sekitar struktur hidraulik.

Dampak rezim aliran terhadap transport sedimen telah banyak dibahas dalam literatur hidraulika sungai. Aliran superkritis, yang dicirikan oleh kecepatan tinggi dan kedalaman relatif rendah, memiliki energi spesifik besar yang mendorong peningkatan mobilisasi sedimen serta pembentukan lubang gerusan yang lebih dalam [6,23,26]. Dalam kondisi tersebut, pusaran kuat dan fluktuasi tekanan dinamis di sekitar pilar mempercepat proses pengangkatan partikel dasar dan memperluas zona erosi. Sebaliknya, aliran subkritis cenderung memiliki kecepatan lebih rendah dan kedalaman lebih besar, sehingga mendorong deposisi sedimen serta meningkatkan stabilitas dasar sungai [6,12]. Oleh karena itu, transisi rezim aliran yang diamati dalam penelitian ini—dari dominan superkritis menjadi lebih mendekati subkritis setelah pemasangan SPB—secara teoritis mendukung terciptanya kondisi yang lebih stabil terhadap gerusan.

Penurunan bilangan Froude yang terukur dalam eksperimen ini selaras dengan hubungan kuantitatif antara  $Fr$  dan kedalaman gerusan yang telah dilaporkan dalam berbagai studi. Luo dkk. [27], Yang dkk. [28], dan Harasti dkk. [16] menunjukkan bahwa penurunan  $Fr$  secara langsung berkorelasi dengan reduksi kedalaman gerusan, baik dalam pengujian laboratorium maupun pengamatan lapangan.  $Fr$  yang lebih rendah menunjukkan dominasi gaya gravitasi terhadap gaya inersia, sehingga energi yang tersedia untuk menggerakkan sedimen menjadi lebih kecil. Dengan demikian, reduksi  $Fr$  akibat pemasangan SPB dapat diinterpretasikan sebagai indikator keberhasilan dalam menurunkan potensi gerusan lokal.

Selain  $Fr$ , perubahan bilangan Reynolds memberikan perspektif tambahan mengenai efisiensi transport sedimen. [29] dan [30] menegaskan bahwa  $Re$  berhubungan erat dengan intensitas turbulensi dan efisiensi transport partikel sedimen. Nilai  $Re$  yang lebih tinggi mencerminkan dominasi gaya inersia dan turbulensi kuat, yang memperbesar kapasitas aliran dalam mengerosi dasar sungai [31-33]. Dalam penelitian ini, tren penurunan  $Re$  setelah pemasangan SPB menunjukkan bahwa struktur tersebut berperan sebagai peredam energi, meskipun aliran tetap berada dalam rezim turbulen. Penurunan intensitas turbulensi ini secara langsung berkontribusi pada peningkatan stabilitas sedimen dan pengurangan risiko pembentukan lubang gerusan.

Dari perspektif rekayasa, efektivitas SPB dapat dibandingkan dengan metode perlindungan konvensional seperti riprap, collar, dan guide vanes. Pendekatan tradisional umumnya menggunakan elemen padat yang memodifikasi aliran melalui refleksi dan penghalangan langsung. Namun, refleksi aliran oleh struktur padat sering kali menciptakan turbulensi lokal tambahan dan memperparah erosi di lokasi tertentu [23]. Riprap, misalnya, dapat melindungi area di sekitar pilar tetapi berpotensi menyebabkan redistribusi energi aliran ke hilir, sehingga menimbulkan gerusan sekunder.

Sebaliknya, deflektor berpori seperti SPB bekerja dengan prinsip disipasi energi melalui media berpori. Struktur pori memungkinkan sebagian aliran melewati matriks deflektor, menghasilkan distribusi kecepatan yang lebih merata dan mengurangi gradien energi yang tajam. Bento dkk. [34] serta S dkk. [12] menunjukkan bahwa struktur berpori mampu meningkatkan disipasi energi dan menurunkan intensitas turbulensi secara lebih efektif dibanding struktur padat. Studi eksperimental oleh Xu dan Xie [35], Daneshfaraz dkk. [36], dan [37] juga melaporkan bahwa deflektor berpori secara signifikan menurunkan

kedalaman gerusan maksimum serta meningkatkan stabilitas sedimen di sekitar infrastruktur kritis.

Temuan penelitian ini konsisten dengan literatur tersebut, di mana penurunan  $Fr$  dan  $Re$  mengindikasikan berkurangnya energi aliran dan intensitas turbulensi di sekitar pilar. Dengan demikian, SPB dapat diposisikan sebagai solusi hidraulik yang tidak hanya melindungi struktur secara fisik, tetapi juga mengatur dinamika aliran secara komprehensif.

Namun demikian, interpretasi hasil penelitian ini perlu mempertimbangkan keterbatasan yang melekat pada eksperimen skala laboratorium. Varaki dkk. [14], Soori [38] dan Luo dkk. [27] menekankan bahwa model flume skala kecil tidak sepenuhnya mampu mereplikasi kompleksitas sistem sungai alami, termasuk variasi ukuran sedimen, interaksi debit yang berubah-ubah, dan dinamika morfologi saluran. Efek skala juga mempengaruhi kesetaraan bilangan Reynolds dan struktur turbulensi antara model dan prototipe, sehingga hasil eksperimen mungkin mengalami distorsi ketika diterapkan pada skala lapangan.

Schlömer dkk. [39] dan Chen dkk. [40] menunjukkan bahwa ketergantungan pada  $Re$  dalam model skala kecil dapat menghasilkan perbedaan signifikan dalam karakteristik turbulensi dibandingkan kondisi sungai nyata. Oleh karena itu, meskipun tren penurunan  $Fr$  dan  $Re$  dalam penelitian ini memberikan indikasi positif, validasi tambahan melalui pendekatan numerik dan studi lapangan sangat diperlukan.

Kalibrasi model numerik terhadap hasil eksperimen fisik menjadi langkah penting untuk menjembatani kesenjangan skala tersebut. Friedrich dkk. [41], Harlan [18], dan Li dkk. [30] menekankan pentingnya integrasi model fisik dan simulasi numerik dalam memahami mekanisme transport sedimen secara lebih akurat. Pendekatan hibrida ini memungkinkan pengujian berbagai kondisi batas, variasi debit ekstrem, serta skenario morfologi sungai yang sulit direplikasi di laboratorium.

Selain aspek hidraulik dan teknis, pertimbangan ekologis juga menjadi isu penting dalam implementasi deflektor di sungai alami. Struktur hidraulik berpotensi mempengaruhi habitat organisme akuatik, distribusi nutrien, serta dinamika sedimen jangka panjang. Oleh karena itu, desain SPB perlu mempertimbangkan prinsip keberlanjutan dan keseimbangan ekosistem, sebagaimana ditekankan dalam pendekatan rekayasa sungai modern.

Pembahasan ini memperlihatkan bahwa SPB memiliki potensi signifikan sebagai strategi mitigasi gerusan lokal melalui pengendalian rezim aliran dan disipasi energi. Penurunan bilangan Froude dan Reynolds yang konsisten menunjukkan bahwa struktur ini efektif dalam mengubah dinamika aliran menuju kondisi yang lebih stabil dan kurang erusif. Meskipun demikian, keberhasilan implementasi pada skala lapangan memerlukan validasi tambahan melalui integrasi eksperimen fisik, simulasi numerik, dan observasi lapangan untuk memastikan keandalan dan keberlanjutan desain dalam sistem sungai yang kompleks.

## 5. Kesimpulan

Penelitian ini menyimpulkan bahwa pemasangan underwater current deflector (UCD) berbentuk silinder pori bertulang (SPB) secara signifikan memengaruhi karakteristik aliran di sekitar pilar jembatan. Eksperimen laboratorium menunjukkan bahwa SPB mampu menurunkan kecepatan aliran, mereduksi bilangan

Froude dan Reynolds, serta mengubah rezim aliran dari dominan superkritis menuju subkritis yang lebih stabil. Penurunan parameter hidraulik ini menunjukkan bahwa energi aliran dan turbulensi yang biasanya menjadi pemicu gerusan lokal berhasil diredam oleh keberadaan SPB. Secara komparatif, kondisi dengan deflektor menunjukkan performa hidraulik yang lebih baik dibandingkan kondisi tanpa deflektor, memperkuat efektivitas desain SPB dalam mereduksi risiko erosi lokal di sekitar pilar. Keunggulan utama dari SPB terletak pada kemampuannya mengelola dinamika aliran secara adaptif melalui struktur berpori, yang lebih unggul dibanding metode perlindungan struktural konvensional.

## Daftar Pustaka

- [1] Nezhadian DMA, Hamidifar H. Effects of Floating Debris on Flow Characteristics Around Slotted Bridge Piers: A Numerical Simulation. *Water*. 2023;16(1):90.
- [2] Li S. Integrated Turbulence and Machine Learning Models Explain Pier Scour in Erodible Channels. *Water Resources Research*. 2025;61(9).
- [3] Li J, Xu N, Wang H, Fu D, Liu X, Wu W. Experimental Investigation of the Interconnections Between Turbulent Structure and Scouring Topographic Characteristics. *Frontiers in Environmental Engineering*. 2023;2.
- [4] Pradhan S, Dash L, Khatua KK. A Critical Review of Turbulence Characteristics in Open Channel Flow. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2023;11(10):441-50.
- [5] Qiu C, Liu S-h, Huang J, Pan W, Xu R. Influence of Cross-Sectional Shape on Flow Capacity of Open Channels. *Water*. 2023;15(10):1877.
- [6] Gao P, Mou X, Ji H. Refined Simulation Study on the Effect of Scour Environments on Local Scour of Tandem Bridge Piers. *Sustainability*. 2023;15(9):7171.
- [7] Zeng C, Bai Y, Zhou J, Qiu F, Ding S-w, Hu Y, Wang L. Large Eddy Simulation of Compound Open Channel Flows With Floodplain Vegetation. *Water*. 2022;14(23):3951.
- [8] Lade AD, Taye J, Kumar B. Effect of Sand Mining on the Flow Hydrodynamics Around an Oblong Bridge Pier. *Engineering Research Express*. 2021;3(4):045028.
- [9] Hu K, Hu J, Huang TW, Ye X, Jiang S, Lin YT. Hydrodynamic Characteristics of Strong, Unsteady Open-Channel Flow. *Sustainability*. 2023;15(17):12821.
- [10] 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).
- [11] Mondal MS. Local Scour at Complex Bridge Piers in Bangladesh Rivers: Reflections From a Large Study. *Water*. 2022;14(15):2405.
- [12] S SP, Vignesh P, Udhayakumar M, Vishnuram JS, Suresh PK. Scour Evaluation Using HEC RAS Model: A Case Study on Musiri Bridge, Trichy, India. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*. 2023;1280(1):012051.
- [13] Maimun RY, Abdullah, Nizarli, Safwan. Experimental Study on Local Scour Around Bridge Pier Models Generated by Flash Floods Carrying Debris. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*. 2024;1343(1):012028.
- [14] Varaki ME, Tavazo N, Radice A. Using a Bed Sill as a Countermeasure for Clear-Water Scour at a Complex Pier With Inclined Columns Footed on Capped Piles. *Hydrology*. 2022;9(4):65.
- [15] Baranwal A, Das BS. Scouring Around Bridge Pier: A Comprehensive Review of Countermeasure Techniques. *Engineering Research Express*. 2024;6(2):022103.
- [16] 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.
- [17] Yasuda Y, Suzuki S. Prevention Due to Assembled Boulders Against Local Scouring in Low-Head Hydraulic Structures. *Journal of Environmental Science Studies*. 2023;6(2):38.
- [18] Harlan D. Modelling of Flow and Scour Around the Piers With Different Geometric Shapes. *International Journal of Geomate*. 2024;26(113).
- [19] Muhawenimana V, Foad N, Ouro P, Wilson C. Local Scour Patterns Around a Bridge Pier With Cable-Wrapping. *Fluids*. 2022;8(1):3.
- [20] 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.
- [21] Wang D, Yan S, Chen C, Lin J, Wang X, Kazemi E. ISPH Simulation of Solitary Waves Propagating Over a Bottom-Mounted Barrier With  $K-\epsilon$  Turbulence Model. *Frontiers in Environmental Science*. 2021;9.
- [22] Ali A, Waheed Ub, Ashiq MN, Asta MSA, Khorram M. Machine Learning Model for Estimation of Local Scour Depth Around Cylindrical Bridge Piers. *Iraqi Journal of Civil Engineering*. 2022;16(2):1-13.
- [23] Martin CS, Rifo C, Guerra M, Ettmer B, Link Ó. Monitoring Scour at Bridge Piers in Rivers With Supercritical Flows. *Hydrology*. 2023;10(7):147.
- [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] You H, Tinoco RO. Characterization of Porous In-Stream Structures to Assess Their Implications on Flow Dynamics and Sediment Transport. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*. 2025;130(3).
- [26] Li Y, Pan D. Field Measurements of Bridge Pier Scour in a Curved Channel. *Journal of Physics Conference Series*. 2023;2468(1):012126.
- [27] Luo K, Si Y, Lu S, Liang B, Qi H. Characteristics of Reducing Local Scour Around Cylindrical Pier Using a Horn-Shaped Collar. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2022;69(1).
- [28] Yang Y, Li J, Zou W, Chen B. Numerical Investigation of Flow and Scour Around Complex Bridge Piers in Wind-Wave-Current Conditions. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023;12(1):23.
- [29] Molavi A, Kaleybar FA, Rathnayake N, Rathnayake U, Fuladipannah M, Azamathulla HM. Machine Learning Approaches for Simulating Temporal Changes in Bed Profiles Around Cylindrical Bridge Pier: A Comparative Analysis. *Hydrology*. 2025;12(9):238.
- [30] Li Z, Wang J, Sui J, Cheng T, Liu P, Li G. Channel Bed Deformation Around Double Piers in Tandem Arrangement in an S-Shaped Channel Under Ice Cover. *Water*. 2023;15(14):2568.
- [31] Bombar G. Influence of Bridge Piers on Velocity Under Unsteady Flows. *Journal of Innovative Science and Engineering (Jise)*. 2022.
- [32] Dong S, Zhang Z, Li Z, Chen P-p, Wang J, Li G. Analysis of Local Scour Around Double Piers in Tandem Arrangement in an S-Shaped Channel Under Ice-Jammed Flow Conditions. *Water*. 2024;16(19):2831.
- [33] Gaffar F, Rumata NA. Potensi Kerawanan Kenaikan Permukaan Air Laut di Kawasan Pesisir Kecamatan Paju'kukang Kabupaten Bantaeng. *Journal of Green Complex Engineering*. 2024;2(1):35-42.
- [34] Bento AM, Viseu T, Pêgo JP, Couto L. Experimental Characterization of the Flow Field Around Oblong Bridge Piers. *Fluids*. 2021;6(11):370.
- [35] Xu Q, Xie F. Discrete Analysis of Local Scour Morphology of Bridge Piers Affected by Sediment Storage Dam. *Water*. 2023;15(11):2080.
- [36] Daneshfaraz R, Ghaderi A, Sattariyan M, Alinejad B, Asl MM, Francesco SD. Investigation of Local Scouring Around Hydrodynamic and Circular Pile Groups Under the Influence of River Material Harvesting Pits. *Water*. 2021;13(16):2192.
- [37] Pandey M, Pu JH, Pourshahbaz H, Khan MA. Reduction of Scour Around Circular Piers Using Collars. *Journal of Flood Risk Management*. 2022;15(3).
- [38] Soori S. The Effect of Pier Placement on Large Wood Accumulation Probability and Local Scour at Bridge Piers and Abutments: Laboratory Flume Experiments. *Journal of Flood Risk Management*. 2025;18(4).

- [39] Schlömer O, Grams PE, Buscombe D, Herget J. Geometry of Obstacle Marks at Instream Boulders—integration of Laboratory Investigations and Field Observations. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2021;46(3):659-79.
- [40] Chen H, Wang F, Huai W, Li S. Analogues of  $\Pi$  Theorem via Machine Learning for Hydraulic Conveyance Laws. *Water Resources Research*. 2025;61(8).
- [41] Friedrich H, Ravazzolo D, Ruiz-Villanueva V, Schalko I, Spreitzer G, Tunnicliffe J, Weitbrecht V. Physical Modelling of Large Wood (LW) Processes Relevant for River Management: Perspectives From New Zealand and Switzerland. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2021;47(1):32-57.



Copyright ©2026 Aksan Ali, Nenny Karim, Andi Makbul Syamsuri, Sahabuddin Latif. This is an open access article distributed the [Creative Commons Attribution Non Commercial-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)