

Investigasi Eksperimental Pengendalian Gerusan Pilar Jembatan Menggunakan Deflektor Arus Bawah Air Berpori

Andri Baharuddin¹, Nenny Karim^{*1}, Muh. Yunus Ali¹, Sahabuddin Latif²

¹Program Studi Teknik Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Makassar

²Program Studi Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Makassar

ABSTRAK

Gerusan di sekitar pilar jembatan merupakan permasalahan hidraulik yang serius dan dapat mengancam stabilitas serta keselamatan struktur jembatan, khususnya pada sungai dengan variasi debit yang besar. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kecepatan aliran dan debit terhadap gerusan lokal serta mengevaluasi efektivitas penggunaan underwater current deflector dalam mengurangi kedalaman gerusan. Penelitian dilakukan secara eksperimental di laboratorium menggunakan saluran terbuka dengan model pilar jembatan berbentuk silinder pada dua variasi debit. Dua jenis deflektor berpori diuji, yaitu Silinder Pori Bertulang (SPB) dan Silinder Pori Tak Bertulang (SPTB). Kecepatan aliran diukur pada beberapa titik pengamatan, sedangkan kedalaman gerusan maksimum diukur setelah setiap pengujian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan debit menyebabkan kenaikan kecepatan aliran dan kedalaman gerusan maksimum pada kondisi tanpa perlindungan. Pemasangan underwater current deflector terbukti mampu menurunkan kecepatan aliran lokal di dekat dasar saluran dan secara signifikan mengurangi kedalaman gerusan di sekitar pilar. Dibandingkan dengan SPTB, SPB menunjukkan kinerja yang lebih baik, terutama pada debit tinggi, karena memiliki kestabilan struktural yang lebih tinggi dalam memodifikasi pola aliran. Temuan ini menegaskan bahwa kombinasi porositas dan tulangan merupakan faktor penting dalam efektivitas perangkat mitigasi gerusan. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi ilmiah dan praktis dalam perencanaan perlindungan pilar jembatan pada sungai yang rawan terhadap gerusan.

ABSTRACT

Scour around bridge piers is a critical hydraulic problem that can compromise the stability and safety of bridge structures, particularly in rivers with highly variable flow conditions. This study experimentally investigates the influence of flow velocity and discharge on local scour and evaluates the effectiveness of underwater current deflectors in reducing scour depth. Laboratory experiments were conducted in an open-channel flume using a cylindrical bridge pier model under two discharge conditions. Two types of porous deflectors were examined: a Reinforced Porous Cylinder (RPC) and a Non-Reinforced Porous Cylinder (NRPC). Flow velocity was measured at multiple observation points, while maximum scour depth was recorded after each test. The results indicate that increasing discharge leads to higher flow velocities and greater maximum scour depths under unprotected conditions. The installation of underwater current deflectors significantly reduced local flow velocities near the bed and decreased scour depth around the pier. Among the two models, the reinforced porous cylinder consistently demonstrated superior performance, particularly under higher discharge conditions, due to its enhanced structural stability and ability to maintain effective flow modification. These findings highlight the importance of combining porosity and structural reinforcement in scour mitigation devices. The study contributes experimental evidence to the understanding of porous, reinforced flow-control structures as effective countermeasures against bridge pier scour. The results may serve as a practical reference for designing safer and more resilient bridge foundations in rivers prone to severe scour.

ARTICLE HISTORY

Received January 1, 2026

Received in revised form

January 15, 2026

Accepted February 10, 2026

Available online February 12, 2026.

KEYWORDS

gerusan lokal, pilar jembatan, silinder pori bertulang, deflektor arus bawah air, saluran terbuka.

local scour, bridge pier, reinforced porous cylinder, underwater current deflector, open-channel flow.

1. Pendahuluan

Jembatan merupakan salah satu infrastruktur transportasi yang memiliki peran strategis dalam menunjang konektivitas wilayah, mobilitas manusia, serta distribusi barang dan jasa. Keberadaan jembatan tidak hanya berdampak pada aspek teknis transportasi, tetapi juga memiliki implikasi sosial dan ekonomi yang luas, khususnya di wilayah yang dipisahkan oleh sungai atau saluran air. Oleh karena itu, jembatan dituntut untuk memiliki tingkat

keandalan dan keselamatan yang tinggi sepanjang umur layanannya. Namun demikian, dalam praktiknya, banyak jembatan menghadapi permasalahan serius pada struktur bawah, terutama pilar jembatan, akibat proses gerusan lokal (*local scour*) yang dipicu oleh interaksi antara aliran air dan elemen struktur.

Gerusan lokal di sekitar pilar jembatan merupakan fenomena hidraulik yang kompleks dan telah lama diidentifikasi sebagai salah satu penyebab utama kerusakan dan kegagalan jembatan, khususnya pada sungai dengan

dasar aluvial. Proses ini terjadi ketika aliran air yang bergerak dengan kecepatan tertentu berinteraksi dengan pilar jembatan, sehingga menyebabkan gangguan pola aliran dan memicu pembentukan struktur pusaran. Salah satu mekanisme utama yang berperan dalam proses ini adalah terbentuknya pusaran tapal kuda (*horseshoe vortex*) di bagian hulu pilar. Pusaran ini menghasilkan zona bertekanan rendah yang meningkatkan kemampuan aliran untuk mengangkat dan mengangkut partikel sedimen dari dasar sungai, sehingga terbentuk lubang gerusan di sekitar fondasi pilar.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa tingkat keparahan dan perkembangan gerusan lokal sangat dipengaruhi oleh parameter hidraulik utama, seperti kecepatan aliran, debit, dan intensitas turbulensi. Li dkk. [1], Nezhadian dan Hamidifar [2], serta Al-Jubouri dkk. [3] menegaskan bahwa peningkatan kecepatan aliran secara signifikan memperkuat pembentukan pusaran tapal kuda dan mempercepat proses erosi sedimen di sekitar pilar. Hal ini diperkuat oleh temuan Pradhan dkk. [4] yang menunjukkan bahwa pada kondisi aliran cepat, energi kinetik aliran yang tinggi meningkatkan tegangan geser dasar sehingga sedimen menjadi lebih mudah terangkut.

Selain kecepatan aliran, debit aliran juga memainkan peran penting dalam menentukan besarnya gerusan lokal. Debit memengaruhi volume air yang mengalir dan besarnya tegangan geser yang bekerja pada dasar sungai. Hurtado-Herrera dkk. [5] dan Meftah dkk. [6] menjelaskan bahwa peningkatan debit tidak hanya meningkatkan kecepatan rata-rata aliran, tetapi juga memperbesar skala dan intensitas struktur pusaran yang terbentuk di sekitar pilar. Kondisi ini menyebabkan interaksi aliran-sedimen menjadi semakin agresif, terutama pada saat debit tinggi atau kejadian banjir.

Faktor lain yang tidak kalah penting adalah intensitas turbulensi aliran. Turbulensi, yang ditandai oleh fluktuasi kecepatan aliran dalam skala ruang dan waktu, berperan besar dalam meningkatkan mobilitas sedimen dasar. Penelitian oleh Muhawenimana dkk. [7], Yu dkk. [8], dan Yusof [9] menunjukkan bahwa tingkat turbulensi yang tinggi meningkatkan probabilitas terlepasnya partikel sedimen dari dasar sungai, sehingga mempercepat laju gerusan. Variasi struktur turbulen ini juga menyebabkan distribusi gerusan yang tidak seragam di sekitar pilar, yang pada akhirnya menyulitkan prediksi kedalaman gerusan maksimum.

Sejumlah studi menekankan bahwa perubahan struktur aliran turbulen dapat secara signifikan memengaruhi dinamika gerusan lokal dan harus dimodelkan secara cermat untuk memperoleh prediksi yang akurat mengenai kedalaman gerusan. Bauri dkk. [10], Yan dkk. [11], dan Tola dkk. [12] menyoroti bahwa interaksi nonlinier antara kecepatan, debit, dan turbulensi menciptakan kondisi hidraulik yang sangat kompleks di sekitar pilar jembatan. Kompleksitas ini menjadi tantangan tersendiri dalam perancangan hidraulik dan ketahanan struktur jembatan terhadap kegagalan akibat gerusan, sebagaimana juga disampaikan oleh Li dkk. [13] dan Bento dkk. [14].

Dalam konteks praktik rekayasa, gerusan lokal telah diakui sebagai salah satu penyebab dominan kegagalan jembatan, terutama pada sungai dengan variabilitas aliran yang tinggi. Baranwal dkk. [15] serta Eskİ dan Aksoy [16]

melaporkan bahwa erosi di sekitar pilar dapat menyebabkan terjadinya penggerusan fondasi (*undermining*), yang pada akhirnya mengurangi kapasitas dukung dan stabilitas struktur. Pada kondisi aliran dinamis, pembentukan pusaran tapal kuda yang kuat dan turbulensi yang berfluktuasi mempercepat pergerakan sedimen, sehingga meningkatkan kerentanan jembatan terhadap kerusakan [17,18]. Variasi kecepatan aliran akibat perubahan debit juga semakin memperumit interaksi antara aliran dan sedimen, yang berujung pada meningkatnya risiko gerusan [19-21].

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, berbagai metode perlindungan konvensional telah dikembangkan dan diterapkan di lapangan. Beberapa di antaranya adalah penggunaan riprap, pelat collar, submerged vanes, dan sacrificial piles [22-24]. Meskipun metode-metode ini terbukti mampu mengurangi gerusan dalam kondisi tertentu, masing-masing memiliki keterbatasan. Riprap, misalnya, rentan mengalami perpindahan atau kerusakan pada saat aliran besar, sedangkan collar tidak selalu mampu mengubah pola aliran secara signifikan [25,26]. Selain itu, efektivitas sacrificial piles sangat bergantung pada konfigurasi dan penempatannya, serta sering kali tidak memberikan perlindungan yang memadai pada kondisi aliran ekstrem [18,27]. Penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa parameter desain dan kondisi hidraulik setempat sangat menentukan keberhasilan metode-metode konvensional tersebut [28,29].

Seiring dengan keterbatasan metode konvensional, perhatian peneliti dan praktisi mulai beralih pada penggunaan underwater current deflector sebagai alternatif solusi mitigasi gerusan. Deflektor arus bawah air merupakan struktur yang dirancang untuk mengarahkan atau membelokkan aliran menjauhi area yang rentan terhadap erosi, khususnya di sekitar pilar jembatan. Dengan memodifikasi vektor aliran, deflektor dapat mengurangi intensitas pusaran tapal kuda yang menjadi pemicu utama gerusan lokal [30,31]. Implementasi deflektor arus telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam berbagai aplikasi rekayasa hidraulik, termasuk pada bangunan pelimpah dan penyeberangan sungai.

Evaluasi empiris terhadap penggunaan underwater current deflector menunjukkan bahwa penempatan deflektor yang tepat dapat secara signifikan menurunkan risiko erosi dan memperpanjang umur layanan struktur hidraulik. Studi kasus pada proyek irigasi dan jembatan menunjukkan bahwa deflektor mampu menciptakan kondisi aliran yang lebih stabil di sekitar fondasi, sehingga mengurangi laju pengangkutan sedimen [30]. Chavan dkk. [31] juga melaporkan bahwa deflektor yang dirancang dengan baik dapat menurunkan kedalaman gerusan secara signifikan dibandingkan kondisi tanpa perlindungan.

Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian mengenai penggunaan struktur berpori atau permeabel sebagai alat mitigasi gerusan semakin berkembang. Struktur berpori memungkinkan sebagian aliran melewati elemen perlindungan, sehingga dapat mengurangi kecepatan rata-rata aliran dan meningkatkan kemampuan perangkap sedimen di sekitar fondasi. Khan dkk. [32], Mondal [21], dan Bingtao dkk. [33] menunjukkan bahwa collar berpori dan riprap permeabel mampu menyerap dan mendisipasi energi aliran secara lebih efektif, sehingga mengurangi aksi mekanis air terhadap dasar pilar. Selain itu, desain hibrida

yang mengombinasikan elemen berpori dengan struktur konvensional telah diuji pada berbagai kondisi aliran dan menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam menekan kedalaman gerusan tanpa mengorbankan integritas struktur [34,35].

Perkembangan teknologi pemodelan numerik juga turut mendorong kemajuan dalam studi gerusan. Penggunaan perangkat lunak seperti Hydrologic Engineering Center River Analysis System (HEC-RAS) memungkinkan simulasi yang lebih akurat terhadap dinamika aliran dan gerusan, sehingga membantu perancangan struktur berpori yang lebih efektif [34,36]. Meskipun demikian, hasil simulasi numerik tetap memerlukan validasi melalui studi eksperimental untuk memastikan kesesuaiannya dengan kondisi fisik yang sebenarnya.

Berdasarkan tinjauan tersebut, dapat diidentifikasi adanya kebutuhan untuk mengkaji lebih lanjut efektivitas deflektor berpori, khususnya dengan mempertimbangkan aspek kestabilan struktural. Penelitian ini berfokus pada pengembangan dan pengujian underwater current deflector berbentuk silinder pori dengan dua variasi, yaitu Silinder Pori Bertulang (SPB) dan Silinder Pori Tak Bertulang (SPTB). Keberadaan tulangan pada SPB dihipotesiskan mampu meningkatkan kestabilan struktur terhadap gaya hidrodinamika, sehingga memberikan kinerja yang lebih baik dalam mengurangi gerusan dibandingkan SPTB.

Dengan demikian, tujuan utama penelitian ini adalah menganalisis pengaruh kecepatan dan debit aliran terhadap proses gerusan di sekitar pilar jembatan serta membandingkan efektivitas SPB dan SPTB sebagai alat mitigasi gerusan. Hipotesis yang diajukan adalah bahwa deflektor silinder pori bertulang memiliki kemampuan yang lebih unggul dalam menurunkan kecepatan aliran lokal, melemahkan pusaran tapal kuda, dan mengurangi kedalaman gerusan, terutama pada kondisi debit tinggi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan metode perlindungan pilar jembatan berbasis struktur berpori serta menjadi referensi bagi perencana dan praktisi teknik sipil dalam merancang sistem mitigasi gerusan yang lebih efektif dan berkelanjutan.

2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental berbasis pemodelan fisik di laboratorium untuk mengkaji mekanisme gerusan lokal di sekitar pilar jembatan serta mengevaluasi efektivitas penggunaan underwater current deflector berbentuk silinder pori. Pendekatan eksperimental dipilih karena mampu merepresentasikan secara langsung interaksi antara aliran, struktur, dan sedimen dasar dalam kondisi terkontrol. Dengan pengaturan parameter hidraulik yang sistematis, seperti debit, kecepatan aliran, dan waktu pengaliran, penelitian ini memungkinkan pengamatan rinci terhadap perkembangan gerusan serta perubahan pola aliran akibat pemasangan deflektor. Metodologi penelitian disusun dengan mengacu pada praktik umum studi gerusan di laboratorium serta prinsip kesebangunan geometrik, kinematik, dan dinamik agar hasil yang diperoleh relevan untuk kondisi prototipe di lapangan.

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Hidraulika, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Makassar. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada ketersediaan fasilitas saluran terbuka skala laboratorium yang memungkinkan pengendalian debit dan kecepatan aliran secara presisi, sehingga sesuai untuk studi eksperimental gerusan lokal di sekitar pilar jembatan. Lingkungan laboratorium memberikan kondisi yang terkontrol dan reproduktibel, yang sangat penting untuk mengevaluasi pengaruh variasi parameter hidraulik terhadap fenomena gerusan.

Kegiatan penelitian berlangsung selama kurang lebih tiga bulan. Tahap awal penelitian meliputi persiapan dan pembuatan model fisik pilar jembatan serta deflektor, diikuti dengan penyiapan material dasar saluran dan kalibrasi sistem aliran. Tahap selanjutnya adalah pelaksanaan pengujian eksperimental dengan variasi debit dan waktu pengaliran sesuai skenario yang telah direncanakan. Tahap akhir penelitian mencakup pengolahan, analisis, dan interpretasi data hasil pengukuran kecepatan aliran dan kedalaman gerusan.

Sebagai gambaran umum mengenai lokasi dan fasilitas laboratorium yang digunakan dalam penelitian ini, [Gambar 1](#) menyajikan tampilan lokasi penelitian di Laboratorium Hidraulika Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar. Gambar ini diletakkan pada akhir sub-bab ini untuk memberikan konteks visual mengenai lingkungan eksperimen.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

2.2 Pengumpulan Data dan Prosedur Percobaan

Pengumpulan data dilakukan melalui serangkaian percobaan menggunakan saluran terbuka berbentuk trapesium yang dirancang menyerupai kondisi aliran sungai alami. Saluran uji terbuat dari beton dengan dinding kaca transparan pada beberapa sisi untuk memudahkan pengamatan visual terhadap pola aliran dan perkembangan gerusan. Dimensi geometrik saluran meliputi lebar dasar, lebar atas, tinggi, dan panjang total yang telah ditentukan untuk memastikan aliran berkembang secara stabil sebelum berinteraksi dengan pilar jembatan.

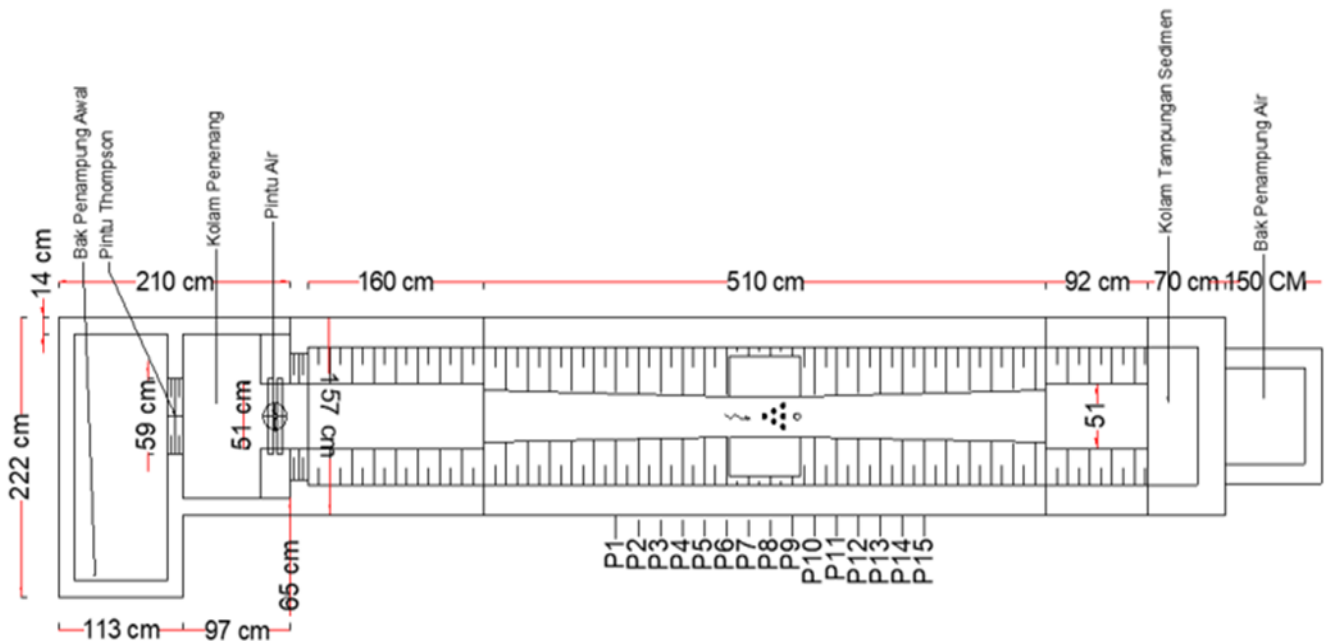
Dasar saluran diisi dengan material pasir bergradasi seragam yang merepresentasikan sedimen dasar sungai aluvial. Sebelum setiap pengujian, permukaan dasar diratakan untuk memperoleh kondisi awal yang homogen. Model pilar jembatan kemudian ditempatkan di tengah saluran pada jarak tertentu dari hulu, sehingga aliran yang

menuju pilar telah berkembang penuh. Setelah itu, model deflektor dipasang sesuai dengan konfigurasi pengujian yang direncanakan.

Sistem pengaliran air diatur menggunakan bak penampung di bagian hulu yang dilengkapi dengan pintu pengatur debit dan kolam penenang. Debit aliran divariasikan dengan mengatur bukaan pintu air sehingga diperoleh dua kondisi debit utama, yaitu Q^1 dan Q^2 . Pada setiap pengujian, aliran dibiarkan mengalir hingga mencapai kondisi stabil sebelum pengambilan data dimulai. Variasi waktu pengaliran diterapkan untuk mengamati perkembangan gerusan dari kondisi awal hingga mendekati kondisi stabil. Pengukuran kecepatan aliran dilakukan pada sejumlah titik pengamatan yang tersebar di sepanjang

saluran menggunakan alat ukur kecepatan aliran. Sementara itu, kedalaman gerusan diukur setelah aliran dihentikan dengan menggunakan alat ukur skala pada beberapa titik di sekitar pilar untuk menentukan kedalaman gerusan maksimum. Seluruh prosedur pengujian ini mengacu pada pendekatan eksperimental yang lazim digunakan dalam studi gerusan lokal di laboratorium [15,19,37].

Untuk memberikan gambaran visual mengenai sistem eksperimen dan karakteristik geometrik saluran terbuka yang digunakan, [Gambar 2](#) menyajikan model saluran terbuka dengan penampang trapesium. Gambar ini ditempatkan setelah penjelasan mengenai spesifikasi dan dimensi saluran.



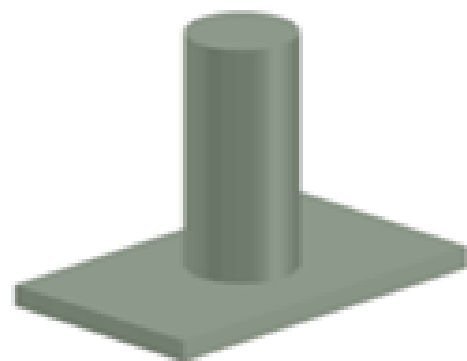
Gambar 1. Model saluran terbuka dengan penampang berbentuk trapesium

2.3 Model Pilar Jembatan

Model pilar jembatan yang digunakan dalam penelitian ini berbentuk silinder dan terbuat dari bahan beton, yang dipilih untuk merepresentasikan pilar jembatan pada kondisi lapangan. Pilar memiliki dimensi tertentu yang disesuaikan dengan skala permodelan laboratorium dan ditempatkan secara tegak di tengah saluran. Penempatan pilar pada jarak tertentu dari bagian hulu dimaksudkan agar aliran yang menuju pilar berada dalam kondisi stabil dan berkembang penuh, sehingga interaksi aliran-struktur dapat diamati secara representatif.

Bentuk silinder dipilih karena merupakan salah satu bentuk pilar yang paling umum digunakan dalam praktik rekayasa jembatan, sekaligus banyak dikaji dalam literatur gerusan lokal. Dengan menggunakan pilar berbentuk silinder, hasil penelitian ini dapat dibandingkan secara langsung dengan temuan penelitian terdahulu serta model empiris yang telah ada.

Untuk memperjelas bentuk, material, dan konfigurasi model pilar yang digunakan, [Gambar 3](#) menampilkan model pilar jembatan berbentuk silinder yang dipasang di dalam saluran uji. Gambar ini diletakkan setelah uraian spesifikasi.



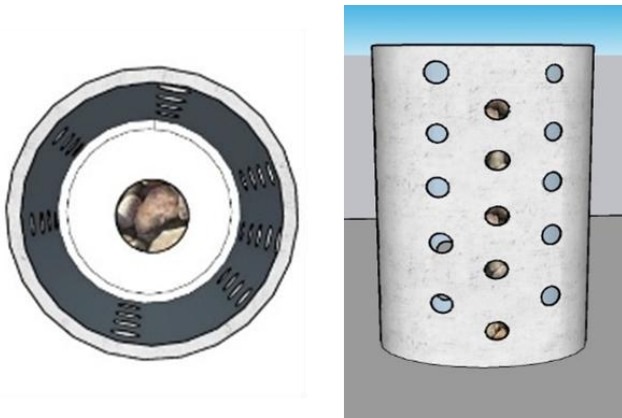
Gambar 2. Model pilar jembatan berbentuk silinder

2.4 Model Deflector

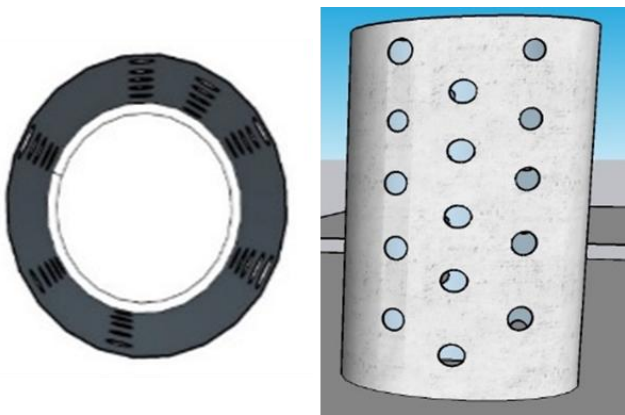
Deflektor yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas dua tipe utama, yaitu Silinder Pori Bertulang (SPB) dan Silinder Pori Tak Bertulang (SPTB). Kedua deflektor dirancang dengan prinsip struktur berpori yang memungkinkan sebagian aliran melewati badan deflektor, sehingga energi aliran dapat tereduksi sebelum mencapai pilar jembatan. Perbedaan utama antara kedua tipe deflektor

terletak pada keberadaan tulangan pada SPB, yang dihipotesiskan mampu meningkatkan kestabilan struktural terhadap gaya hidrodinamika.

Model deflektor dibuat dari bahan akrilik dengan dimensi yang telah ditentukan berdasarkan skala permodelan. Ukuran diameter, tinggi deflektor, dan diameter pori dirancang agar memenuhi prinsip kesebangunan geometrik antara model dan prototipe. Penerapan kesebangunan geometrik bertujuan untuk menjaga proporsionalitas dimensi sehingga pola aliran dan mekanisme gerusan yang terjadi pada model dapat mewakili kondisi sebenarnya di lapangan [38,39].



Gambar 3. Model Deflector Silinder Pori Bertulang (SPB)



Gambar 4. Model Deflector Silinder Pori Tak Bertulang (SPTB)

Selain kesebangunan geometrik, penelitian ini juga mempertimbangkan kesebangunan kinematik dan dinamik. Kesebangunan kinematik dicapai dengan menjaga rasio kecepatan dan pola aliran agar konsisten dengan kondisi prototipe, sementara kesebangunan dinamik dijaga dengan mempertimbangkan rasio gaya inersia dan gaya gravitasi melalui penerapan hukum kesebangunan Froude [22,40]. Pendekatan ini sejalan dengan praktik umum dalam pemodelan fisik gerusan lokal di sekitar pilar jembatan [1,41].

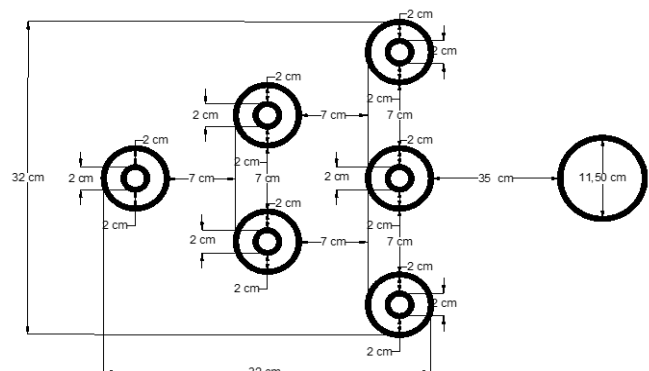
Untuk memudahkan perbandingan visual antara kedua tipe deflektor yang diuji, Gambar 4 menampilkan model Deflektor Silinder Pori Bertulang (SPB), sedangkan Gambar 5 menampilkan model Deflektor Silinder Pori Tak Bertulang (SPTB). Kedua gambar tersebut diletakkan setelah penjelasan masing-masing tipe deflektor.

2.5 Model Formasi dan Skenario Pengujian

Penempatan deflektor terhadap pilar jembatan dilakukan dengan menggunakan formasi berbentuk segitiga. Pemilihan formasi ini didasarkan pada pertimbangan hidraulik untuk memaksimalkan kemampuan deflektor dalam mengarahkan aliran dan mereduksi energi sebelum aliran mencapai pilar. Jarak antara deflektor dan pilar ditetapkan berdasarkan hasil kajian awal dan literatur terkait, sehingga deflektor dapat bekerja secara efektif tanpa mengganggu stabilitas aliran secara keseluruhan.

Pengujian dilakukan pada dua variasi debit, yaitu Q^1 dan Q^2 , yang merepresentasikan kondisi aliran relatif rendah dan tinggi. Selain itu, variasi waktu pengaliran diterapkan untuk mengamati perkembangan gerusan dari waktu ke waktu. Pada setiap skenario pengujian, pengamatan dilakukan pada sejumlah titik yang telah ditentukan untuk memperoleh distribusi kecepatan aliran dan pola gerusan di sekitar pilar.

Sebagai ilustrasi mengenai konfigurasi penempatan deflektor dan pilar dalam saluran uji, Gambar 6 menyajikan detail formasi pengujian yang digunakan dalam penelitian ini. Gambar ini diletakkan pada akhir sub-bab untuk memperjelas skenario pengujian yang diterapkan.



Gambar 5. Detail formasi 1

2.5 Analisis Data

Data hasil pengujian dianalisis menggunakan pendekatan deskriptif dan komparatif. Analisis deskriptif dilakukan untuk menggambarkan karakteristik kecepatan aliran dan kedalaman gerusan pada setiap kondisi pengujian, sedangkan analisis komparatif digunakan untuk membandingkan kinerja deflektor SPB dan SPTB terhadap kondisi tanpa deflektor.

Kecepatan aliran yang diukur pada setiap titik pengamatan dirata-ratakan untuk memperoleh nilai kecepatan representatif pada masing-masing debit dan waktu pengaliran. Kedalaman gerusan maksimum di sekitar pilar digunakan sebagai parameter utama dalam evaluasi tingkat erosi dasar. Perbandingan dilakukan antara kondisi tanpa deflektor, dengan SPB, dan dengan SPTB pada debit Q^1 dan Q^2 .

Hasil analisis selanjutnya disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan interpretasi perubahan pola aliran dan tingkat gerusan. Pendekatan analisis ini memungkinkan evaluasi yang sistematis terhadap efektivitas masing-masing model deflektor serta memberikan dasar yang kuat untuk pembahasan dan penarikan kesimpulan mengenai kinerja underwater current

deflector dalam mengurangi gerusan di sekitar pilar jembatan.

3. Hasil dan Pembahasan

Bagian ini menyajikan hasil utama penelitian berdasarkan data eksperimen yang diperoleh dari pengujian di laboratorium. Penyajian hasil dilakukan secara objektif tanpa interpretasi mendalam, dengan fokus pada hubungan antara kecepatan aliran dan debit, serta perbandingan kedalaman gerusan di sekitar pilar jembatan pada kondisi tanpa deflektor, dengan Silinder Pori Bertulang (SPB), dan dengan Silinder Pori Tak Bertulang (SPTB). Data hasil pengujian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memperjelas pola serta perbedaan antar kondisi pengujian.

3.1 Pengaruh Kecepatan Aliran terhadap Debit

Pengujian pengaruh kecepatan aliran terhadap debit dilakukan pada dua variasi debit, yaitu Q^1 dan Q^2 , dengan waktu pengaliran 15 menit. Pengukuran kecepatan aliran dilakukan pada 15 titik pengamatan yang tersebar di sepanjang saluran, baik pada kondisi tanpa deflektor (pilar saja), dengan pemasangan SPB, maupun dengan pemasangan SPTB. Pendekatan ini digunakan untuk memperoleh gambaran distribusi kecepatan aliran secara spasial serta perubahan karakteristik aliran akibat pemasangan deflektor.

Secara umum, hasil pengukuran menunjukkan bahwa peningkatan debit aliran diikuti oleh peningkatan kecepatan aliran rata-rata, sejalan dengan prinsip dasar mekanika fluida yang menyatakan bahwa debit merupakan fungsi dari luas penampang dan kecepatan aliran ($Q = A \times V$). Dengan geometri saluran yang relatif konstan, perubahan debit terutama tercermin melalui perubahan kecepatan aliran, sebagaimana umum dilaporkan dalam studi saluran terbuka di laboratorium [26,35].

Tabel 1. menyajikan data kecepatan aliran rata-rata pada masing-masing titik pengamatan untuk debit Q^1 pada variasi waktu 15 menit. Data ini mencakup kondisi tanpa deflektor, dengan SPB, dan dengan SPTB.

Tabel 1. Kecepatan aliran rata-rata pada debit Q^1 (15 menit)

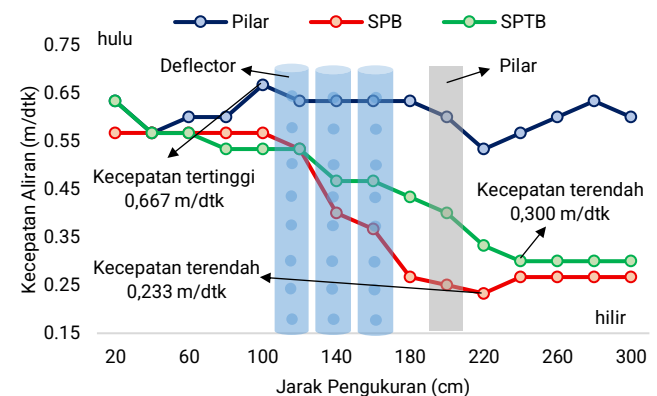
Debit (Q^1)			
Titik Pengukuran	Pilar	SPB	SPTB
Kecepatan Rata-Rata (v)/(m/dtk)			
P1	0,633	0,567	0,633
P2	0,567	0,567	0,567
P3	0,600	0,567	0,567
P4	0,600	0,567	0,533
P5	0,667	0,567	0,533
P6	0,633	0,533	0,533
P7	0,633	0,400	0,467
P8	0,633	0,367	0,467
P9	0,633	0,267	0,433
P10	0,600	0,250	0,400
P11	0,533	0,233	0,333
P12	0,567	0,267	0,300
P13	0,600	0,267	0,300
P14	0,633	0,267	0,300
P15	0,600	0,267	0,300

Berdasarkan data pada Tabel 1, kecepatan aliran pada kondisi tanpa deflektor cenderung lebih tinggi dan relatif seragam di sepanjang titik pengamatan. Setelah pemasangan deflektor, baik SPB maupun SPTB, kecepatan aliran menunjukkan penurunan yang cukup signifikan, khususnya

pada titik-titik pengamatan di bagian hilir pilar. Penurunan ini mencerminkan kemampuan deflektor dalam mereduksi energi aliran dan memodifikasi pola aliran di sekitar pilar.

Untuk memperjelas tren perubahan kecepatan aliran secara visual, Gambar 7 menyajikan grafik perbandingan distribusi kecepatan aliran pada debit Q^1 untuk kondisi tanpa deflektor, dengan SPB, dan dengan SPTB. Grafik ini ditempatkan setelah Tabel 1 agar pembaca dapat langsung mengaitkan data numerik dengan pola visual yang ditampilkan.

Gambar 7. Menyajikan gambar data model grafik perbandingan kecepatan pada pilar, SPB dan SPTB pada debit Q^1 variasi waktu 15 menit.



Gambar 6. Perbandingan kecepatan (v) formasi 1 model (SPB) dan (SPTB) pada debit (Q^1).

Gambar 7 menunjukkan bahwa pada debit Q^1 , pemasangan deflektor menyebabkan penurunan kecepatan aliran yang lebih nyata pada model SPB dibandingkan SPTB, khususnya pada titik-titik pengamatan setelah melewati pilar. Pola ini menegaskan perbedaan respons aliran terhadap dua tipe deflektor yang diuji.

Tabel 2. menyajikan data kecepatan aliran rata-rata untuk debit Q^2 pada variasi waktu 15 menit.

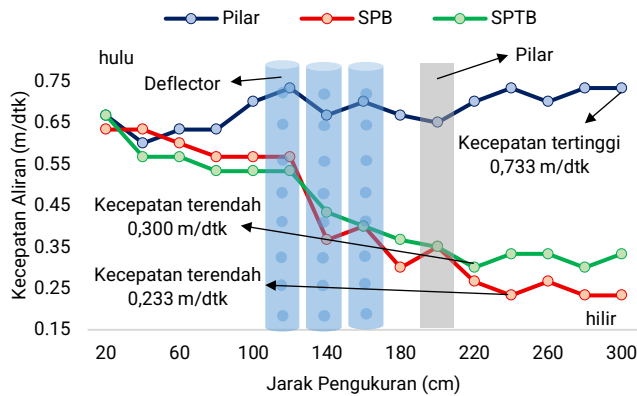
Tabel 2. Kecepatan aliran rata-rata pada debit Q^2 (15 menit)

Titik Pengukuran	Debit (Q^2)		
	Pilar	SPB	SPTB
Kecepatan Rata-Rata (v)/(m/dtk)			
P1	0,667	0,633	0,667
P2	0,600	0,633	0,567
P3	0,633	0,600	0,567
P4	0,633	0,567	0,533
P5	0,700	0,567	0,533
P6	0,733	0,567	0,533
P7	0,667	0,367	0,433
P8	0,700	0,400	0,400
P9	0,667	0,300	0,367
P10	0,650	0,350	0,350
P11	0,700	0,267	0,300
P12	0,733	0,233	0,333
P13	0,700	0,267	0,333
P14	0,733	0,233	0,300
P15	0,733	0,233	0,333

Hasil pada Tabel 2 menunjukkan bahwa peningkatan debit dari Q^1 ke Q^2 menyebabkan kenaikan kecepatan aliran maksimum pada hampir seluruh titik pengamatan, baik pada kondisi tanpa deflektor maupun dengan pemasangan deflektor. Namun demikian, pola penurunan kecepatan akibat pemasangan SPB dan SPTB tetap terlihat, terutama di area hilir pilar, yang mengindikasikan bahwa deflektor

masih berfungsi dalam mengendalikan aliran meskipun pada kondisi debit yang lebih besar.

Gambar 8. menyajikan gambar data model grafik perbandingan kecepatan pada pilar, SPB dan SPTB pada debit Q^1 variasi waktu 15 menit.



Gambar 7. Perbandingan kecepatan (v) formasi 1 model (SPB) dan (SPTB) pada debit (Q^2).

Selanjutnya, **Gambar 8** menampilkan grafik perbandingan kecepatan aliran pada debit Q^2 . Gambar ini diletakkan setelah **Tabel 2** untuk memberikan visualisasi tren kecepatan aliran pada kondisi debit yang lebih tinggi. Pada grafik ini terlihat bahwa meskipun kecepatan aliran awal lebih besar, pemasangan deflektor tetap mampu menurunkan kecepatan aliran secara signifikan, dengan SPB menunjukkan penurunan yang lebih besar dibandingkan SPTB pada sebagian besar titik pengamatan.

Secara keseluruhan, hasil pengukuran kecepatan aliran menunjukkan adanya hubungan yang konsisten antara debit dan kecepatan aliran, serta adanya pengaruh nyata dari pemasangan deflektor dalam memodifikasi distribusi kecepatan aliran di sekitar pilar jembatan. Data ini menjadi dasar penting untuk analisis gerusan yang disajikan pada sub-bab berikutnya.

3.2 Perbandingan Gerusan di Sekitar Pilar

Pengukuran gerusan dilakukan untuk mengevaluasi kedalaman gerusan maksimum di sekitar pilar jembatan pada kondisi tanpa deflektor, dengan SPB, dan dengan SPTB. Pengukuran dilakukan setelah aliran dihentikan pada setiap skenario pengujian, dengan fokus pada identifikasi kedalaman gerusan maksimum sebagai indikator utama tingkat erosi dasar.

Tabel 3. menyajikan data kedalaman gerusan pada debit Q^1 untuk variasi waktu pengaliran 15 menit.

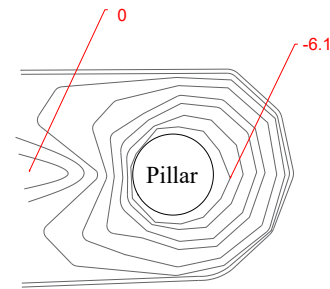
Tabel 3. Kedalaman gerusan pada debit Q^1 (15 menit)

Titik Pengukuran	Debit (Q^1)		
	Pilar	SPB	SPTB
	Kedalaman gerusan (cm)	Kedalaman gerusan (cm)	Kedalaman gerusan (cm)
P1	-6,0	-3,2	-3,5
P2	-6,1	-3,3	-3,3
P3	-5,8	-3,1	-3,1
P4	-5,7	-3,0	-3,0
P5	-4,5	-3,0	-2,4
P6	-3,0	-1,3	-0,6
P7	-0,9	0,3	0,4
P8	-0,5	-0,2	0,1
P9	-2,6	-1,2	-0,4
P10	-3,9	-1,8	-1,4

Titik Pengukuran	Debit (Q^1)		
	Pilar	SPB	SPTB
	Kedalaman gerusan (cm)	Kedalaman gerusan (cm)	Kedalaman gerusan (cm)
P11	-4,6	-2,4	-2,1
P12	-5,6	-2,8	-3,2

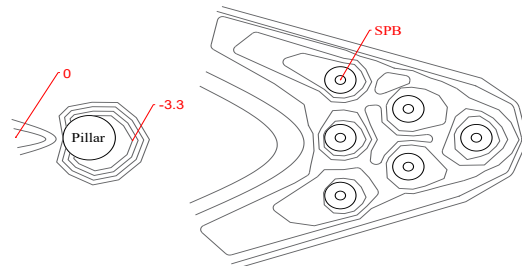
Data pada **Tabel 3** menunjukkan bahwa pada debit Q^1 , kondisi tanpa deflektor menghasilkan kedalaman gerusan maksimum yang paling besar. Setelah pemasangan deflektor, baik SPB maupun SPTB, kedalaman gerusan mengalami penurunan yang cukup signifikan. Perbedaan nilai gerusan antara SPB dan SPTB terlihat relatif kecil, namun SPB secara umum menunjukkan kedalaman gerusan maksimum yang lebih rendah dibandingkan SPTB.

Gambar 9. menyajikan gambar data model kontur pada area sekitar pilar, pada debit Q^1 variasi waktu 15 menit.



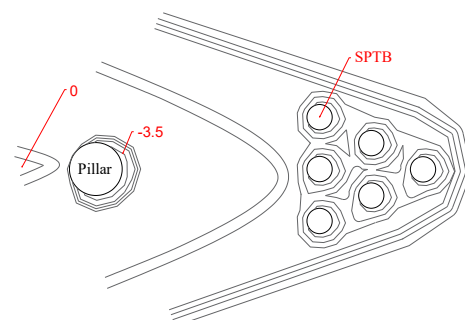
Gambar 8. Gerusan lokal pada pilar dengan debit Q^1

Gambar 10. menyajikan gambar data model kontur pada area sekitar pilar setelah penempatan deflektor model silinder pori bertulang (SPB), pada debit Q^1 variasi waktu 15 menit.



Gambar 9. Gerusan lokal pada deflector model (SPB) dengan debit Q^1

Gambar 11. menyajikan gambar data model kontur pada area sekitar pilar setelah penempatan deflektor model silinder pori tak bertulang (SPTB), pada debit Q^1 variasi waktu 15 menit.



Gambar 10. Gerusan lokal pada deflector model (SPTB) dengan debit Q^1

Untuk memvisualisasikan pola dan distribusi gerusan pada debit Q^1 , **Gambar 9** menampilkan kontur gerusan di sekitar pilar pada kondisi tanpa deflektor. Gambar ini ditempatkan setelah **Tabel 3** untuk menunjukkan secara visual tingkat erosi dasar yang terjadi tanpa perlindungan tambahan.

Selanjutnya, **Gambar 10** menyajikan kontur gerusan pada kondisi dengan pemasangan deflektor Silinder Pori Bertulang (SPB) pada debit Q^1 , sedangkan **Gambar 11** menampilkan kontur gerusan pada kondisi dengan pemasangan Silinder Pori Tak Bertulang (SPTB). Kedua gambar ini diletakkan secara berurutan setelah **Gambar 9** untuk memudahkan perbandingan visual antar kondisi pengujian.

Hasil visualisasi kontur menunjukkan bahwa pemasangan deflektor mengubah pola gerusan di sekitar pilar, dengan lubang gerusan yang lebih dangkal dan area terpengaruh yang lebih terbatas dibandingkan kondisi tanpa deflektor. Perbedaan pola antara SPB dan SPTB juga dapat diamati dari bentuk dan kedalaman kontur yang terbentuk.

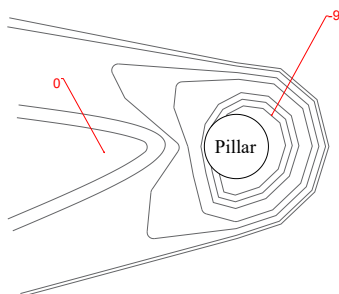
Tabel 4. Menunjukkan rincian Gerusan pada pilar, SPB dan SPTB dengan debit Q^2 , adapun data yang digunakan yaitu variasi waktu 15 menit.

Tabel 4. Kedalaman gerusan pada debit Q^2 (15 menit)

Titik Pengukuran	Debit (Q^2)		
	Pilar	SPB	SPTB
	Kedalaman gerusan (cm)	Kedalaman gerusan (cm)	Kedalaman gerusan (cm)
P1	-8,9	-3,5	-3,9
P2	-8,6	-3,4	-3,8
P3	-8,4	-3,1	-3,8
P4	-8,8	-3	-3,5
P5	-8,8	-3	-2,3
P6	-5,0	-1	-1,0
P7	-4,6	0	0,4
P8	-5,0	-1	-0,1
P9	-6,1	-2	-2,0
P10	-7,5	-3	-2,9
P11	-8,4	-3,1	-3,3
P12	-9,0	-3,2	-3,8

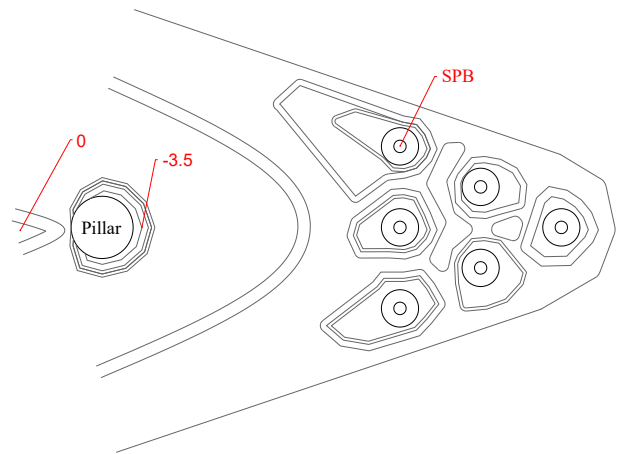
Berdasarkan data pada **Tabel 4**, peningkatan debit dari Q^1 ke Q^2 menyebabkan peningkatan kedalaman gerusan maksimum pada seluruh kondisi pengujian. Namun demikian, pemasangan deflektor tetap menunjukkan pengaruh yang signifikan dalam menurunkan kedalaman gerusan dibandingkan kondisi tanpa deflektor. Pada debit Q^2 , perbedaan kinerja antara SPB dan SPTB menjadi lebih jelas, dengan SPB menunjukkan kedalaman gerusan maksimum yang lebih kecil.

Gambar 12. menyajikan gambar data model kontur pada area sekitar pilar, pada debit Q^1 variasi waktu 15 menit.



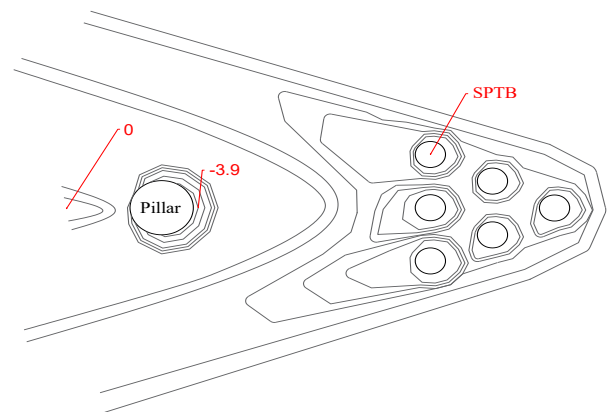
Gambar 11. Gerusan lokal pada pilar dengan debit Q^2

Gambar 13. menyajikan gambar data model kontur pada area sekitar pilar setelah penempatan deflektor model silinder pori bertulang (SPB), pada debit Q^2 variasi waktu 15 menit.



Gambar 12. Gerusan lokal pada deflektor model (SPB) dengan debit Q^2

Gambar 14. menyajikan gambar data model kontur pada area sekitar pilar setelah penempatan deflektor model silinder pori tak bertulang (SPTB), pada debit Q^2 variasi waktu 15 menit.



Gambar 13. Gerusan lokal pada deflektor model (SPTB) dengan debit Q^2

Visualisasi kontur gerusan untuk debit Q^2 disajikan secara berurutan pada **Gambar 12** hingga **Gambar 14**. **Gambar 12** menampilkan kontur gerusan pada kondisi tanpa deflektor, **Gambar 13** menunjukkan kontur gerusan dengan pemasangan SPB, dan **Gambar 14** menampilkan kontur gerusan dengan pemasangan SPTB. Penempatan gambar-gambar ini setelah **Tabel 4** bertujuan untuk memperjelas perbedaan pola dan kedalaman gerusan secara visual pada kondisi debit tinggi.

Secara keseluruhan, hasil pengukuran dan visualisasi gerusan menunjukkan bahwa debit aliran berpengaruh kuat terhadap kedalaman gerusan maksimum di sekitar pilar jembatan. Pemasangan deflektor, baik SPB maupun SPTB, mampu menurunkan tingkat gerusan dibandingkan kondisi tanpa deflektor, dengan SPB menunjukkan kinerja yang lebih baik pada kedua variasi debit. Temuan-temuan ini disajikan secara kuantitatif melalui tabel dan secara kualitatif melalui kontur gerusan, yang selanjutnya akan dibahas lebih lanjut pada bagian pembahasan.

4. Pembahasan

Bagian pembahasan ini menginterpretasikan hasil penelitian eksperimental dengan mengaitkannya secara sistematis pada teori hidraulika serta temuan-temuan penelitian terdahulu terkait gerusan lokal di sekitar pilar jembatan. Fokus utama pembahasan diarahkan pada tiga aspek utama, yaitu mekanisme pengurangan gerusan oleh deflektor berpori, peran tulangan dalam meningkatkan kestabilan struktur deflektor, serta perbedaan kinerja Silinder Pori Bertulang (SPB) dan Silinder Pori Tak Bertulang (SPTB) pada kondisi debit rendah dan debit tinggi. Selain itu, implikasi praktis dari hasil penelitian terhadap perencanaan perlindungan pilar jembatan juga dianalisis secara komprehensif dengan tetap mempertahankan konsistensi terhadap data empiris yang telah disajikan pada bagian hasil.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemasangan deflektor berpori di hulu pilar jembatan mampu memodifikasi pola aliran secara signifikan. Pada kondisi tanpa deflektor, aliran yang langsung menghantam pilar menghasilkan percepatan lokal yang tinggi dan pembentukan pusaran tapal kuda yang kuat. Pusaran ini meningkatkan aliran turun (*down-flow*) di depan pilar dan memperbesar tegangan geser dasar di sekitar fondasi, sebagaimana tercermin pada kedalaman gerusan maksimum yang relatif besar pada kedua variasi debit. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa interaksi langsung antara aliran dan permukaan silinder pilar menjadi faktor dominan dalam memicu erosi lokal. Setelah pemasangan deflektor, distribusi kecepatan aliran di sekitar pilar berubah secara nyata, ditandai dengan penurunan kecepatan aliran lokal di dekat dasar saluran serta berkurangnya intensitas pusaran yang terbentuk. Temuan ini sejalan dengan laporan Lee dkk. [25] dan Li dan Pan [42] yang menyatakan bahwa struktur berpori dan permeabel dapat mengganggu aliran langsung menuju pilar, sehingga mengurangi kekuatan aliran turun (*down-flow*) dan melemahkan pembentukan pusaran tapal kuda sebagai mekanisme utama gerusan lokal.

Secara hidraulik, mekanisme utama pengurangan gerusan oleh deflektor berpori berkaitan erat dengan kemampuan struktur tersebut dalam mendistribusikan ulang energi aliran sebelum mencapai pilar. Porositas memungkinkan sebagian aliran melewati badan deflektor, sehingga energi kinetik aliran tidak terkonsentrasi secara langsung pada satu titik di depan pilar. Interaksi antara aliran dan elemen berpori menghasilkan disipasi energi melalui gesekan internal dan perubahan arah aliran, yang pada akhirnya menciptakan zona kecepatan rendah di sekitar pilar. Zona ini berperan penting dalam menurunkan tegangan geser dasar serta mengurangi kapasitas aliran dalam mengangkut sedimen. Dengan berkurangnya tegangan geser yang bekerja pada permukaan sedimen, potensi terlepasnya partikel dasar menjadi lebih kecil, sehingga kedalaman gerusan dapat ditekan. Kondisi ini mendukung hasil penelitian Harasti dkk. [43] yang menunjukkan bahwa perangkat pengendali aliran berpori mampu menggeser zona aktif transport sedimen menjauh dari fondasi pilar dan secara signifikan mengurangi kedalaman gerusan lokal.

Selain itu, perubahan pola aliran akibat pemasangan deflektor juga berimplikasi pada distribusi turbulensi di

sekitar pilar. Pada kondisi tanpa perlindungan, turbulensi tinggi di depan dan di sekitar sisi pilar mempercepat proses entrainment partikel sedimen. Dengan adanya deflektor, intensitas turbulensi yang mencapai pilar menjadi lebih terkendali karena sebagian energi telah tereduksi di hulu. Hal ini memperkuat argumentasi bahwa pengurangan gerusan tidak hanya disebabkan oleh penurunan kecepatan rata-rata, tetapi juga oleh perubahan struktur aliran dan distribusi energi turbulen yang bekerja pada dasar saluran.

Perbandingan kinerja antara SPB dan SPTB menunjukkan bahwa keberadaan tulangan memberikan kontribusi penting terhadap efektivitas deflektor, terutama pada debit yang lebih tinggi. Pada debit rendah (Q^1), kedua model deflektor mampu mengurangi kecepatan aliran dan kedalaman gerusan secara signifikan dibandingkan kondisi tanpa deflektor. Namun, perbedaan kinerja antara SPB dan SPTB masih relatif kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa pada kondisi aliran dengan energi yang belum terlalu besar, faktor porositas menjadi komponen dominan dalam mengendalikan pola aliran, sementara kontribusi tulangan terhadap kestabilan struktur belum menjadi faktor pembeda yang signifikan.

Sebaliknya, pada debit tinggi (Q^2), perbedaan kinerja antara SPB dan SPTB menjadi lebih jelas dan konsisten. SPB menunjukkan kedalaman gerusan maksimum yang lebih kecil dibandingkan SPTB pada hampir seluruh titik pengamatan. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui peran tulangan dalam meningkatkan kestabilan struktural deflektor terhadap gaya hidrodinamika yang lebih besar. Pada kondisi aliran dengan kecepatan dan turbulensi tinggi, gaya angkat, gaya geser, serta tekanan dinamis yang bekerja pada permukaan deflektor meningkat secara signifikan. Deflektor bertulang memiliki kekakuan dan ketahanan struktural yang lebih baik terhadap deformasi maupun pergeseran, sehingga mampu mempertahankan posisi, orientasi, dan konfigurasi awalnya selama pengujian berlangsung. Dengan konfigurasi yang tetap stabil, fungsi hidraulik deflektor dalam membelokkan dan mereduksi energi aliran tetap optimal. Temuan ini sejalan dengan Baranwal dan Das [23] dan Chen dkk. [38] yang menekankan bahwa kestabilan dan penguatan struktur merupakan faktor kunci dalam efektivitas perangkat mitigasi gerusan, terutama pada kondisi aliran ekstrem.

Kinerja SPB yang lebih baik pada debit tinggi juga konsisten dengan penelitian Nezhadian dan Hamidifar [2] serta Gao dkk. [44], yang melaporkan bahwa perangkat perlindungan yang diperkuat secara struktural menunjukkan efektivitas yang lebih tinggi dibandingkan model tanpa penguatan ketika diuji pada kondisi debit besar. Keberadaan tulangan tidak hanya meningkatkan ketahanan mekanis terhadap gaya hidrodinamika, tetapi juga meminimalkan kemungkinan terjadinya getaran atau perubahan posisi yang dapat mengurangi efektivitas deflektor. Dengan demikian, SPB mampu mempertahankan zona kecepatan rendah di sekitar pilar meskipun aliran mengalami peningkatan energi, sehingga reduksi gerusan tetap terjaga pada tingkat yang lebih optimal dibandingkan SPTB.

Jika dibandingkan dengan model empiris dan teoritis gerusan yang ada, hasil penelitian ini memberikan beberapa implikasi penting. Banyak model empiris konvensional memprediksi kedalaman gerusan berdasarkan parameter

seperti kecepatan aliran, debit, diameter pilar, dan karakteristik sedimen, tanpa mempertimbangkan secara eksplisit efek porositas dan penguatan struktur pada perangkat mitigasi. Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan deflektor berpori, khususnya yang diperkuat, dapat menghasilkan kedalaman gerusan yang lebih kecil dibandingkan prediksi beberapa model empiris yang tidak memasukkan faktor tersebut. Hal ini sejalan dengan temuan Panici dan Kripakaran [45] serta Baranwal dkk. [15] yang menyatakan bahwa struktur berpori bertulang cenderung memberikan hasil eksperimen yang lebih baik dibandingkan prediksi model konvensional yang berbasis asumsi aliran seragam tanpa modifikasi struktur [46].

Perbedaan antara hasil eksperimen dan prediksi model empiris juga menguatkan argumen bahwa kompleksitas aliran di sekitar struktur berpori tidak sepenuhnya terwakili dalam formulasi empiris klasik. Bingtao dkk. [33] dan Devi dan Kumar [47] menyoroti bahwa model empiris yang mengabaikan efek porositas, interaksi aliran mikro di dalam struktur, serta perubahan distribusi turbulensi cenderung melebihkan kedalaman gerusan. Oleh karena itu, hasil penelitian ini mendukung perlunya pengembangan atau penyesuaian model gerusan yang memasukkan parameter tambahan, seperti tingkat porositas, keberadaan tulangan, konfigurasi dan jarak deflektor terhadap pilar, serta karakteristik interaksi aliran-struktur secara lebih detail.

Adaptasi model gerusan berdasarkan hasil eksperimen juga memiliki implikasi penting bagi praktik rekayasa modern. Penelitian-penelitian terkini menunjukkan bahwa integrasi data eksperimen ke dalam pendekatan pemodelan lanjutan, termasuk metode berbasis machine learning dan genetic programming, dapat meningkatkan akurasi prediksi gerusan secara signifikan [33,48,49]. Dengan memasukkan variabel terkait porositas dan penguatan struktur ke dalam basis data pelatihan model, prediksi kedalaman gerusan dapat menjadi lebih representatif terhadap kondisi nyata di lapangan. Dalam konteks ini, hasil penelitian ini dapat berfungsi sebagai data validasi tambahan untuk memperkaya model prediktif yang lebih adaptif dan responsif terhadap variasi kondisi hidraulik [48].

Dari sudut pandang perencanaan dan desain, temuan penelitian ini memiliki implikasi praktis yang relevan dan aplikatif. Penggunaan deflektor berpori bertulang dapat dipertimbangkan sebagai alternatif atau pelengkap metode perlindungan konvensional pada pilar jembatan, terutama di sungai dengan variasi debit yang besar dan potensi aliran ekstrem. SPB menawarkan kombinasi antara kemampuan hidraulik dalam mereduksi energi aliran dan kestabilan struktural yang memadai untuk menghadapi gaya hidrodinamika tinggi. Kombinasi tersebut menjadikan SPB sebagai solusi yang berpotensi lebih andal dibandingkan deflektor berpori tanpa tulangan pada kondisi operasi yang berat, khususnya pada periode banjir atau lonjakan debit.

Namun demikian, penerapan hasil penelitian ini pada skala lapangan tetap memerlukan kajian lanjutan dengan mempertimbangkan kondisi spesifik sungai, seperti karakteristik sedimen, distribusi ukuran butir, variasi debit musiman, serta keterbatasan konstruksi dan pemeliharaan. Karena penelitian ini dilakukan pada skala laboratorium dengan pengendalian variabel yang ketat, efek skala, pengaruh debris, serta dinamika morfologi sungai jangka panjang belum sepenuhnya terakomodasi. Oleh karena itu,

penelitian lanjutan pada skala prototipe atau melalui simulasi numerik terkalibrasi sangat disarankan untuk memperkuat validitas dan generalisasi temuan ini.

Pembahasan ini menunjukkan bahwa deflektor berpori, khususnya Silinder Pori Bertulang, bekerja melalui dua mekanisme utama, yaitu modifikasi pola aliran dan peningkatan kestabilan struktural, untuk mengurangi gerusan lokal di sekitar pilar jembatan. Temuan ini tidak hanya konsisten dengan teori dan penelitian terdahulu, tetapi juga memberikan kontribusi empiris yang penting bagi pengembangan metode perlindungan pilar jembatan yang lebih efektif, adaptif, dan berorientasi pada ketahanan struktur terhadap variasi kondisi aliran.

5. Kesimpulan

Penelitian ini menegaskan bahwa gerusan lokal di sekitar pilar jembatan sangat dipengaruhi oleh karakteristik aliran, khususnya variasi debit dan kecepatan aliran. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa peningkatan debit dari Q^1 ke Q^2 secara konsisten meningkatkan kecepatan aliran dan kedalaman gerusan maksimum pada kondisi tanpa perlindungan. Interaksi antara aliran dan pilar memicu pembentukan pusaran tapal kuda dan peningkatan turbulensi di dekat dasar saluran, yang berkontribusi langsung terhadap proses pengangkutan sedimen dan pelemahan fondasi pilar. Kondisi ini menegaskan pentingnya penerapan sistem perlindungan yang efektif untuk menjaga stabilitas struktur jembatan, terutama pada sungai dengan fluktuasi debit yang besar.

Pemasangan underwater current deflector terbukti mampu menurunkan kecepatan aliran lokal dan mengurangi kedalaman gerusan secara signifikan pada kedua variasi debit. Deflektor bekerja dengan memodifikasi pola aliran di sekitar pilar, mengurangi intensitas pusaran tapal kuda, serta menurunkan energi aliran yang bekerja pada dasar sungai. Dari dua tipe deflektor yang diuji, Silinder Pori Bertulang (SPB) menunjukkan kinerja yang lebih unggul dibandingkan Silinder Pori Tak Bertulang (SPTB), baik pada debit rendah maupun debit tinggi. Keberadaan tulangan memberikan kestabilan struktural tambahan yang memungkinkan deflektor mempertahankan fungsinya secara optimal pada kondisi aliran dengan energi tinggi.

Secara ilmiah, penelitian ini memberikan kontribusi empiris terhadap pengembangan metode mitigasi gerusan berbasis struktur berpori bertulang, serta memperkuat temuan bahwa porositas dan kestabilan struktural merupakan faktor kunci dalam efektivitas perangkat perlindungan pilar. Dari sisi praktis, hasil penelitian ini dapat dijadikan referensi dalam perencanaan perlindungan pilar jembatan, khususnya pada sungai dengan potensi debit tinggi dan risiko gerusan besar. Penelitian lanjutan disarankan untuk menguji kinerja deflektor pada skala lapangan serta mempertimbangkan variasi karakteristik sedimen dan kondisi aliran alami guna memperluas penerapan hasil penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] 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.

- [2] Nezhadian DMA, Hamidifar H. Effects of Floating Debris on Flow Characteristics Around Slotted Bridge Piers: A Numerical Simulation. *Water*. 2023;16(1):90.
- [3] Al-Jubouri M, Ray RP, Abbas EH. Advanced Numerical Simulation of Scour Around Bridge Piers: Effects of Pier Geometry and Debris on Scour Depth. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024;12(9):1637.
- [4] Pradhan TK, Thakurta A, Roussinova V, Balachandrar R, Biswas N. On the Disruption of the Horseshoe Vortex in Flow Past Bed-Mounted Cylinders. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2025;52(4):405-20.
- [5] Hurtado-Herrera M, Zhang W, Hammouti A, Bang DPV, Nguyen KD. Numerical Study of the Flow and Blockage Ratio of Cylindrical Pier Local Scour. *Applied Sciences*. 2023;13(20):11501.
- [6] Meftah MB, Padova DD, Serio FD, Mossa M. Secondary Currents With Scour Hole at Grade Control Structures. *Water*. 2021;13(3):319.
- [7] Muhawenimana V, Foad N, Ouro P, Wilson C. Local Scour Patterns Around a Bridge Pier With Cable-Wrapping. *Fluids*. 2022;8(1):3.
- [8] Yu P, Xu S, Chen J, Zhu L, Zhou J, Yu L, Sun Z. Three-Dimensional Numerical Modeling of Local Scour Around Bridge Foundations Based on an Improved Wall Shear Stress Model. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024;12(12):2187.
- [9] Yusof SNHM. Investigation of Water Flow Behaviour Around Circular Bridge Pier Using CFD-Ansys Fluent. *Construction*. 2025;5(2):press.
- [10] Bauri KP, Sarkar A, Nones M. Three-Dimensional Bursting Process and Turbulent Coherent Structure Within Scour Holes at Various Development Stages Around a Cylindrical Structure. *Journal of Fluid Mechanics*. 2024;997.
- [11] Yan W, Chen J, Wang Z, Zhu Z, Yan J. Numerical Investigation on Local Scour and Flow Field Around the Bridge Pier Under Protection of Perforated Baffle and Ring-Wing Plate. *Buildings*. 2022;12(10):1544.
- [12] Tola S, Tinoco J, Matos JC, Obrien EJ. Scour Detection With Monitoring Methods and Machine Learning Algorithms—A Critical Review. *Applied Sciences*. 2023;13(3):1661.
- [13] Li Z, Zhao X, Liu J, Sun Z. Study on Experimental and Flow Simulation for New Scour Protection Measure. *Physics of Fluids*. 2025;37(9).
- [14] Bento AM, Viseu T, Pêgo JP, Couto L. Experimental Characterization of the Flow Field Around Oblong Bridge Piers. *Fluids*. 2021;6(11):370.
- [15] Baranwal A, Das BS, Setia B. A Comparative Study of Scour Around Various Shaped Bridge Pier. *Engineering Research Express*. 2023;5(1):015052.
- [16] Eski ÖY, Aksoy AO. Investigation of Local Scour Hole Dimensions Around Circular Bridge Piers Under Steady State Conditions. *Teknik Dergi*. 2022;33(2):11707-27.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Hussein N, Shukur AH, Majeed ZH. Influence of Pile-Cap Elevation and Skewness on Clear Water Scour at Complex Bridge Piers. *Mathematical Modelling and Engineering Problems*. 2023;10(2):523-9.
- [21] Mondal MS. Local Scour at Complex Bridge Piers in Bangladesh Rivers: Reflections From a Large Study. *Water*. 2022;14(15):2405.
- [22] Sang L, Wang J, Cheng T, Hou Z, Sui J. Local Scour Around Tandem Double Piers Under an Ice Cover. *Water*. 2022;14(7):1168.
- [23] Baranwal A, Das BS. Scouring Around Bridge Pier: A Comprehensive Review of Countermeasure Techniques. *Engineering Research Express*. 2024;6(2):022103.
- [24] 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).
- [25] 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.
- [26] Xu Q, Xie F. Discrete Analysis of Local Scour Morphology of Bridge Piers Affected by Sediment Storage Dam. *Water*. 2023;15(11):2080.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Qi H, Yuan T, Zou W, Tian W, Li J. Numerical Study on Local Scour Reduction Around Two Cylindrical Piers Arranged in Tandem Using Collars. *Water*. 2023;15(23):4079.
- [30] Sahu SK, Sethy K, Naik JK. Estimation of Local Scour Depth Around Bridge Pier. *International Journal of Engineering*. 2024;37(11):2181-91.
- [31] Chavan VS, Chen S-E, Shanmugam NS, Tang W, Diemer JA, Allan C, dkk. Modeling of Progressive Scouring of a Pier-on-Bank. *Civileng*. 2022;3(2):365-84.
- [32] Khan KA, Waseem M, Alam M, Khan M, Leta MK. Experimental Investigation of Pier Scour Depth and Its Scour Hole Pattern for Different Shapes. *Journal of Infrastructure Policy and Development*. 2024;8(4).
- [33] 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).
- [34] Al-Jubouri M, Ray RP. A Comparative Study of Local Scour Depth Around Bridge Piers. *Pollack Periodica*. 2023;18(1):100-5.
- [35] Harasti A, Gilja G, Adžaga N, Žic M. Analysis of Variables Influencing Scour on Large Sand-Bed Rivers Conducted Using Field Data. *Applied Sciences*. 2023;13(9):5365.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] Qi H, Yuan T, Zhao F, Chen G, Tian W, Li J. Local Scour Reduction Around Cylindrical Piers Using Permeable Collars in Clear Water. *Water*. 2023;15(5):897.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] Li Y, Pan D. Field Measurements of Bridge Pier Scour in a Curved Channel. *Journal of Physics Conference Series*. 2023;2468(1):012126.
- [43] 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.
- [44] Gao P, Mou X, Ji H. Simulation Study on Local Scour Characteristics of Tandem Bridge Piers in a Straight River Under a Changing Environment. *Sustainability*. 2023;15(15):11776.
- [45] 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).
- [46] Kadam G, Dawari BM. Experimental, Analytical, and Numerical Evaluation of Bridge Pier Scouring. *Civil and Environmental Engineering*. 2024;20(1):411-25.
- [47] Devi G, Kumar M. Estimation of Local Scour Depth Around Twin Piers Using Gene Expression Programming (Local Scour Around Twin Piers). *Water Science & Technology Water Supply*. 2022;22(6):5915-32.

- [48] Kanazawa T, Ushiwatari Y. Kinematic Model for Shear Assessment of RC Short Columns Subjected to Frost Damage. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2021;19(4):335-45.
- [49] 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.



Copyright ©2026 Andri Baharuddin, Nenny Karim, Muh. Yunus Ali, 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/)