ISSN 0853-2982 eISSN 2549-2659

JURNAL TEKNIK SIPIL

Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil

PentaPod[1]: Armor Beton Jenis Baru untuk Perlindungan Pantai dan Sungai dan Aplikasinya dalam Konstruksi Check Dam PentaPod

Dantje Kardana Natakusumah*

Kelompok Keahlian Teknik Sumber Daya Air, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan dan Laboratorium Mekanika Fluida dan Hidrodinamika, Pusat Rekayasa Industri Institut Teknologi Bandung, E-mail: dknpub@gmail.com

Hendra Achiari

Program Studi Teknik Kelautan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, E-mail: achiarihendra@gmail.com

Eka Oktariyanto Nugroho

Kelompok Keahlian Teknik Sumber Daya Air, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, E-mail: nugrohoeka@itb.ac.id

Fitra Adinata

Konsultant PT. Sapta Adhi Pratama, E-mail: fitra240484@gmail.com

Syarif Hidayatulloh

Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, E-mail: syarif.cmh@gmail.com

Jonathan Angelo Ishakputra

Magister Pengelolaan Sumber Daya Air, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, E-mail: jonathanangelo82@gmail.com

Danis Aryo Bronto

Magister Pengelolaan Sumber Daya Air, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, E-mail: danis@dabestconsultant.com

Kiromi Syabhan

Magister Pengelolaan Sumber Daya Air, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, E-mail: kiromisyabhan@pu.go.id

Abstrak

Check dam, yang dikenal sebagai bendungan kecil atau bendung pengendali sedimen, adalah struktur yang dibangun melintang aliran air, seperti sungai atau saluran drainase, dengan tujuan utama untuk mengendalikan aliran air dan mengurangi kecepatannya. Umumnya dibuat dari pasangan batu atau beton, namun penelitian ini menggunakan checkdam yang terbuat dari pentapod. Check Dam PentaPod yang terbuat dari PentaPod menawarkan solusi armor beton inovatif dengan fitur interkonektivitas, dirancang khusus untuk mengurangi kecepatan air dan secara efektif mencegah erosi dan degradasi dasar sungai. Dengan bentuk lintas seksional yang kompak, struktur ini ditempatkan secara strategis di sungai guna memperlambat aliran air dan meningkatkan stabilitas struktural terhadap gaya dinamis arus sungai. Uji model hidraulik Check Dam PentaPod yang dilakukan oleh Laboratorium Sungai dan Sedimentasi ITB bertujuan mensimulasikan berbagai kondisi hidrodinamik untuk mengevaluasi efektivitas dan kinerja struktur dalam menjaga integritas dan stabilitas di bawah beragam kondisi aliran dan tinggi air. Langkah ini penting untuk memastikan kemampuan Check Dam PentaPod dalam mengontrol degradasi dasar sungai dan menjaga stabilitas tepi sungai secara efektif.

Kata-kata Kunci: *PentaPod, armor beton baru, check dam, perlindungan alur sungai.*

Abstract

Check dams, also known as small dams or sediment control dams, are structures built across waterways like rivers or drainage channels. Their primary purpose is to regulate water flow and reduce its velocity. Traditionally

[1] PentaPod atau tepatnya armor beton PentaPod-PSE (PentaPod Piramida Segi Empat), adalah paten atas nama Institut Teknologi Bandung dengan Inventor Ir. Dantje Kardana Natakusumah ST, MSc, PhD., terdaftar di Direktorat Jendral Kekayaan Intelektual, Kemetrian Hukum dan HAM, Republik Indonesia.

* *Penulis Korespondensi: dknpub@gmail.com*

Diterima 30 Januari 2024, Direvisi 7 April 2024, Diterima untuk dipublikasikan 22 April 2024

Copyright ©2024 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2024.31.1.4

constructed from stone or concrete, this research explores check dams made from a novel material: PentaPods. The PentaPod Check Dam utilizes prefabricated PentaPod concrete units with interlocking features. This innovative armor solution is specifically designed to decrease water velocity and effectively prevent erosion and riverbed degradation. Due to its compact cross-sectional form, the structure can be strategically placed in rivers to slow down water flow and enhance its structural stability against the dynamic forces of river currents.Hydraulic model testing of the PentaPod Check Dam, conducted by the ITB River and Sedimentation Laboratory, aims to simulate various hydrodynamic conditions. This evaluation process assesses the structure's effectiveness and performance in maintaining integrity and stability under diverse flow rates and water levels. These tests are crucial for ensuring the PentaPod Check Dam's ability to effectively control riverbed degradation and safeguard the stability of riverbanks.

Keywords: *PentaPod, new concrete armor, check dam, river channel protection.*

1. Pendahuluan

Alur sungai, sebagai jalur alami yang terbentuk dari proses aliran air dan pengangkutan sedimen yang berkesinambungan, memegang peran penting dalam membentuk geomorfologi lanskap di sekitarnya serta dalam menyediakan ruang hidup bagi beragam ekosistem. Keterlibatan yang mendalam dalam memahami bagaimana interaksi dinamis antara struktur morfologi alur sungai dan proses-proses hidrolik berlangsung menjadi aspek kritis dalam mengelola sumber daya air secara efektif dan juga dalam usaha untuk melestarikan serta melindungi lingkungan. Dengan memahami berbagai karakteristik alur sungai, termasuk cara mereka menyesuaikan diri dan berubah sepanjang waktu sejalan dengan perubahan kondisi hidrologis dan dampak dari kegiatan manusia, kita dapat memperoleh wawasan berharga yang mendukung pengembangan strategi konservasi dan rehabilitasi untuk ekosistem sungai, yang tidak hanya berkelanjutan tetapi juga responsif terhadap kebutuhan lingkungan dan masyarakat sekitar.

Memahami hubungan yang kompleks antara struktur morfologis saluran air dan mekanisme hidrolik merupakan hal yang sangat penting dalam rangka pengelolaan sumber daya air secara berkelanjutan serta dalam upaya perlindungan terhadap lingkungan. Menurut Wikipedia (n.d.), morfologi sungai merupakan studi tentang bentuk dan struktur sungai serta bagaimana mereka berubah sepanjang waktu. Selanjutnya, Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (n.d.) menjelaskan dalam Modul 6 Morfologi Sungai bahwa karakteristik fisik sungai, seperti bentuk alur dan pola aliran, memiliki dampak langsung terhadap ekosistem di sekitarnya.

Analisis mendalam terhadap morfologi sungai dan interaksinya dengan dinamika air membantu dalam merancang strategi yang efektif untuk mitigasi banjir, pengendalian erosi, dan pemulihan ekosistem sungai. Seperti yang dijelaskan oleh Academistan (n.d.) dan Heritage dkk (2001), Alur sungai dapat dibagi secara konseptual menjadi tiga zona berbeda, masing-masing dengan karakteristik unik yang mempengaruhi bagaimana air mengalir dan berinteraksi dengan lingkungan sekitarnya.

a. **Dasar Saluran (Channel Bed):** Ini merupakan zona terendah dari saluran, yang terbentuk oleh aliran air dan transportasi sedimen. Dasar saluran mengalami perubahan dinamis akibat proses erosi, deposisi, dan evolusi bentuk dasar, yang menentukan jalur aliran sungai dan berubah sesuai dengan kondisi hidrologi dan sedimentologi.
b. **Tepian Saluran (Channel Banks):** Merupakan sisi miring dari saluran yang terdiri dari tanah dan vegetasi, menyediakan habitat bagi berbagai spesies terestrial dan akuatik. Tepian saluran memainkan peran kunci dalam menstabilkan saluran dan mengatur aliran banjir, serta berfungsi sebagai filter yang menyerap polutan dan menstabilkan temperatur air.
c. **Dataran Banjir (Floodplain):** Area datar yang berada di luar tepian saluran dan terendam selama periode aliran tinggi, berfungsi sebagai zona penyimpan air banjir dan tempat deposisi sedimen. Dataran banjir memiliki peran penting dalam menjaga keseimbangan alur sungai dan mendukung keragaman ekologis dengan menyediakan habitat yang luas bagi flora dan fauna.

Zona-zona ini berinteraksi dan beradaptasi secara terus-menerus, mencerminkan sifat dinamis dari sungai yang merespons fluktuasi aliran air dan proses transportasi sedimen. Namun, aktivitas manusia dan gangguan alami dapat mengganggu keseimbangan ini, menyebabkan proses degradasi dasar sungai dan erosi tepian sungai yang menjadi tantangan signifikan untuk stabilitas sungai dan kesehatan ekosistem. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam tentang hubungan antara morfologi saluran dan proses hidrolik adalah kunci untuk mengelola sumber daya air secara efektif dan melindungi lingkungan sungai. Untuk pemahaman mendalam tentang dinamika sungai, seseorang dapat merujuk pada karya Knighton (1998) tentang "Fluvial Forms and Processes" yang menawarkan perspektif baru tentang subjek tersebut.

1.1 Degradasi dasar sungai

Deteriorasi dasar sungai melibatkan penurunan dasar sungai melalui pengangkutan sedimen, sementara erosi tepi sungai merujuk pada pengikisan tepi sungai, yang dipengaruhi oleh proses alami dan aktivitas manusia. Aktivitas manusia seperti deforestasi, praktik pertanian yang tidak berkelanjutan, dan urbanisasi memperparah fenomena ini dengan meningkatkan tingkat sedimen di sungai dan mengganggu pola aliran alami. Konstruksi dan ekstraksi air untuk irigasi lebih memperburuk degradasi dasar sungai dengan menahan sedimen dan menghambat pengisian kembali dasar sungai. Perubahan iklim memperparah tantangan ini dengan

Diterima 30 Januari 2024, Direvisi 7 April 2024, Diterima untuk dipublikasikan 22 April 2024
Copyright © 2024 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2024.31.1.4

meningkatkan kejadian dan keparahan peristiwa cuaca, menyebabkan banjir dan kekeringan yang intens yang mempercepat degradasi dasar sungai dan erosi tepi. Dampak dari degradasi dasar sungai dan tepi yang tererosi sangat luas, memengaruhi ketersediaan air, keamanan, mengurangi produksi pertanian, dan meningkatkan risiko banjir (Binh dkk, 2018).

1.2 Erosi tepi sungai

Erosi di sepanjang tepi sungai, proses erosi tanah di dekat badan air, adalah kejadian yang luas dengan dampak signifikan terhadap lingkungan dan ekonomi. Erosi ini dipengaruhi oleh elemen seperti arus, ombak, dan pola cuaca yang dapat diperburuk oleh tindakan seperti pembangunan, penebangan hutan, dan penambangan pasir. Erosi ini menimbulkan ancaman terhadap tepi sungai yang membahayakan infrastruktur dan komunitas. Erosi juga mengubah ekosistem sungai, yang mempengaruhi kualitas air dan melepaskan sedimen ke dalam badan air yang dapat membahayakan kehidupan dan aktivitas navigasi. Mengenali penyebab dan dampak dari erosi tepi sungai sangat penting untuk menerapkan strategi, seperti memulihkan vegetasi penstabil tepi dan mengelola dataran banjir untuk meminimalkan efeknya dan melindungi sungai kita dan area terdekat (Das dkk, 2014).

1.3 Metode untuk mencegah degradasi sungai dan erosi tepi sungai

Degradasi sungai, yang ditunjukkan melalui penurunan tingkat dasar sungai serta erosi di tepi sungai atau pengikisan tepian, adalah isu-isu yang berkaitan erat dan menimbulkan dampak besar, seperti kerusakan pada infrastruktur, kehilangan habitat, dan terjadinya erosi tanah. Solusi untuk permasalahan ini membutuhkan strategi menyeluruh yang melibatkan baik skala cekungan sungai maupun penanganan pada segmen sungai tertentu.

Di tingkat cekungan, strategi pengelolaan daerah aliran sungai yang efektif memainkan peran penting dalam mencegah degradasi. Upaya pengelolaan yang komprehensif dan terpadu diperlukan untuk mengatasi berbagai tantangan yang dihadapi oleh daerah aliran sungai. Ini mencakup:

a. **Pengurangan Erosi Tanah:** Mengadopsi metode pertanian konservasi seperti penanaman penutup dan terasering untuk mengurangi erosi tanah dan menahan sedimen. Praktik ini tidak hanya meminimalkan beban sedimen yang masuk ke dalam aliran sungai tetapi juga mendorong infiltrasi air hujan ke dalam tanah, mengurangi aliran permukaan dan potensi banjir (Lal, 2015).

b. **Intervensi Pengelolaan:** Mengelola operasi dan bendungan dengan cara yang lebih alami, menyesuaikan pelepasan air untuk lebih mencerminkan pola aliran alami sungai, vital dalam mendukung ekosistem sungai (Poff et al., 1997). Dengan meniru pola aliran alami, usaha ini bertujuan untuk menjaga kontinuitas ekologis sungai, mendukung migrasi ikan, dan mempertahankan fungsi ekosistem sungai yang sehat.

Di tingkat alur sungai, penggunaan gabungan antara langkah struktural dan non-struktural merupakan strategi yang efektif untuk mengatasi degradasi sungai dan erosi tepian sungai. Strategi ini dirancang untuk bekerja secara sinergis, dengan masing-masing memiliki peran penting dalam pemeliharaan dan pemulihan ekosistem sungai. Ini mencakup:

a. **Langkah-langkah Struktural:** Pendekatan ini melibatkan penerapan solusi fisik untuk mengurangi dampak erosi dan mendukung stabilitas struktural aliran sungai. Misalnya, pemasangan check dam, Ground Sill dan Rivertment merupakan metode yang efektif untuk memperlambat aliran air, memfasilitasi pengendapan sedimen, dan mengurangi erosi alur sungai.

b. **Langkah-langkah Non-struktural:** Pendekatan ini lebih berfokus pada manajemen dan pemulihan ekosistem dengan minimal intervensi fisik, menekankan pada perlindungan dan pemulihan habitat alami. Peningkatan vegetasi di dalam aliran dan di sepanjang tepian sungai merupakan strategi kunci, karena vegetasi berperan vital dalam menstabilkan tanah, menyaring polutan, dan menyediakan habitat bagi kehidupan liar.

Kombinasi langkah-langkah struktural dan non-struktural, baik di tingkat cekungan maupun di tingkat alur sungai, membantu dalam menciptakan solusi yang lebih holistik dan berkelanjutan terhadap masalah degradasi sungai dan erosi tepi sungai. Dengan menerapkan pendekatan yang seimbang, tujuan untuk tidak hanya melindungi infrastruktur dan properti manusia tetapi juga mendukung keanekaragaman hayati dan fungsi ekosistem sungai yang sehat dapat dicapai.

1.4 Check Dam sebagai solusi pencegahan degradasi sungai

Salah satu langkah struktural yang digunakan untuk mencegah degradasi sungai adalah check dam. Check dam adalah struktur kecil melintang yang dibangun melintasi sungai, saluran drainase, lembah, atau kanal, yang terutama dirancang untuk memperlambat aliran air dan mengurangi erosi. Dengan menghambat kecepatan air, check dam memfasilitasi pengendapan sedimen, yang pada akhirnya meningkatkan tingkat dasar di saluran atau jalur air.

1.4.1 Fungsi check dam

Fungsi check dam adalah dengan menciptakan hambatan kecil yang mengurangi kecepatan air mengalir. Pengurangan kecepatan ini mengurangi kekuatan erosif air, mencegahnya dari mengikis dasar saluran dan tepiannya. Selain itu, hambatan tersebut memungkinkan sedimen yang dibawa oleh air untuk mengendap di belakang dam, secara bertahap meningkatkan tingkat dasar dari waktu ke waktu (Wikipedia contributors, 2024; Lucas-Borja dkk, 2024).

1.4.2 Manfaat check dam

Manfaat dari check dam sangat beragam. Selain mengurangi erosi dan melindungi tanah, mereka

Diterima 30 Januari 2024, Direvisi 7 April 2024, Diterima untuk dipublikasikan 22 April 2024
Copyright ©2024 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2024.31.1.4

berkontribusi pada stabilisasi saluran, mempertahankan kedalaman air, dan memulihkan jalur air yang terdegradasi. Check dam juga membantu meningkatkan kualitas air dengan menangkap sedimen dan polutan serta nutrisi yang dibawanya, sementara penumpukan sedimen di belakangnya dapat menciptakan habitat bagi kehidupan akuatik. Selain itu, check dam relatif sederhana dan murah dibandingkan dengan langkah pengendalian erosi lainnya, membuatnya lebih mudah diakses untuk implementasi dan pemeliharaan.

1.4.3 Jenis-jenis check dam

Berikut adalah beberapa jenis check dam yang umum, dikategorikan berdasarkan material yang digunakan untuk membangun Check Dam:

a. **Check Dam Tanah:** Dibangun dari tanah menawarkan fleksibilitas dan dapat disesuaikan untuk menyatu harmonis dengan lingkungan. Namun, memerlukan konstruksi yang cermat dan rentan terhadap erosi tanpa perawatan yang tepat.

b. **Check Dam Kayu:** Biasanya digunakan untuk struktur yang kurang tahan lama. Dapat dibangun dan dibongkar dengan cepat tanpa banyak kesulitan. Mungkin tidak cocok untuk kondisi aliran dengan debit besar dan kecepatan tinggi.

c. **Check Dam Batu:** Dibangun menggunakan batu, efektif biaya, dan sederhana untuk dibangun. Mungkin kurang stabil dan permeabel dibandingkan dengan jenis lain.

d. **Check Dam Gabion:** Terdiri dari keranjang kawat yang diisi dengan batu, menawarkan fleksibilitas dan permeabilitas yang baik, sehingga cocok untuk berbagai kondisi.

e. **Check Dam Pasangan Batu:** Merupakan metode tradisional perlindungan tepi sungai di Indonesia, telah digunakan selama ratusan tahun. Biasanya dibangun dalam bentuk trapesium, dengan sisi hulu yang miring pada sudut sekitar 45 derajat.

f. **Check Dam Beton:** Dikenal karena daya tahan dan kekuatannya, sering digunakan untuk struktur permanen. Mampu menahan tekanan air serta kondisi lingkungan yang keras selama bertahun-tahun.

g. **Check Dam PentaPod:** Jenis check dam baru yang diperkenalkan di Indonesia, dibangun menggunakan susunan armor beton yang disebut PentaPod. Hadir dengan pendekatan baru dalam pengendalian erosi dan perlindungan sungai yang tidak hanya efektif tetapi juga estetis.

2. PentaPod, Armor Beton Baru untuk Perlindungan Pantai dan Sungai

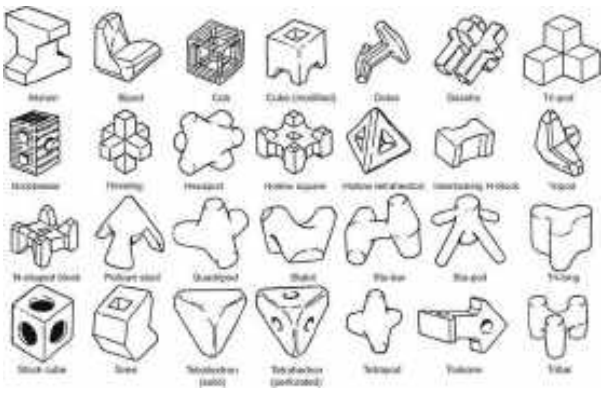
Proses pencarian untuk bentuk armor beton baru diawali dengan melakukan analisis terhadap desain armor beton yang telah digunakan untuk perlindungan Pantai dan sungai, menelaah keefektifan dan kekuatan strukturnya. Langkah selanjutnya melibatkan eksplorasi dan identifikasi bentuk-bentuk yang belum pernah diaplikasikan dalam konteks ini, dengan tujuan menemukan solusi inovatif yang dapat menawarkan perlindungan yang lebih baik terhadap erosi pantai dan dampak lingkungan lainnya. Proses ini tidak hanya terfokus pada peningkatan fungsionalitas, tetapi juga mempertimbangkan aspek estetika, integrasi dengan lingkungan alami, dan kemudahan dalam penerapan teknik konstruksi. Ini merupakan upaya komprehensif untuk mengembangkan teknologi perlindungan pantai yang lebih efisien dan ramah lingkungan, dengan harapan dapat mengatasi tantangan yang dihadapi oleh struktur pantai modern.

2.1 Bentuk-bentuk armor beton yang sudah ada sebelumnya

Bentuk-bentuk armor beton yang sudah ada sebelumnya ditunjukkan oleh Smith pada **Gambar 1** (Smith, 2016) dan juga ditunjukkan oleh Muttray dan Reedijk pada **Gambar 2** (Muttray dan Reedijk, 2008). Gambar-gambar kumpulan armor lainnya dapat ditemukan di berbagai sumber di internet atau dalam berbagai makalah dan buku, yang umumnya sudah tercakup dalam kedua gambar tersebut.

2.2 PentaPod: inovasi baru dengan fitur khas

Setelah menganalisis berbagai bentuk armor beton yang sudah ada sebelumnya, seperti ditunjukkan dalam **Gambar 1** dan **Gambar 2**, ditemukan bahwa bentuk unit armor yang belum ada dalam kedua gambar tersebut



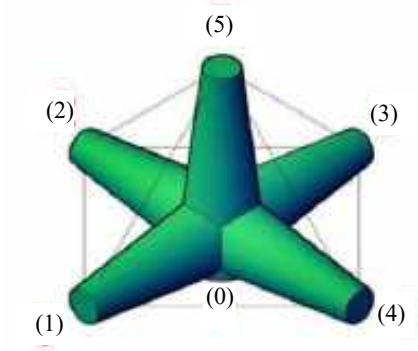
Gambar 1. Unit perlindungan gelombang yang terbuat dari beton (Smith, 2016, Chapter 3)

Randomly placed armour units				Uniformly placed armour units	
Double layer placement			Single layer placement		
Stability factor: Own weight		Own weight and interlocking		Interlocking	Friction
Cube		Tetrapode France, 1950		Accropode France, 1980	Cob UK, 1989
Modified Cube USA, 1959		Akmon NL, 1962		Core-loc® USA, 1998	Diahitis Ireland, 1998
Antifer Cube France, 1973		Tribar USA, 1958		A-Jack USA, 1998	Seabee Australia, 1979
Haro Belgium, 1984		Stabit UK, 1961		Xbloc NL, 2003	Shed UK, 1982
Tripod NL, 1962		Dolos South Africa, 1963			

Gambar 2: Tinjauan umum unit pemecah gelombang (Muttray and Reedijk, 2008)

Diterima 30 Januari 2024, Direvisi 7 April 2024, Diterima untuk dipublikasikan 22 April 2024
Copyright © 2024 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2024.31.1.4

adalah unit armor dengan lima kaki, atau PentaPod. Istilah "PentaPod," atau lebih tepatnya “PentaPod Piramida Segi Empat (PentaPod-SP)," dicirikan oleh keberadaan empat kaki horizontal dan satu kaki vertikal, yang membentuk piramida pentahedral berbasis segi empat seperti yang digambarkan dalam **Gambar 3**.



Gambar 3. PentaPod berbasis segi empat atau Pentahedron berbasis segi empat

Seperti yang digambarkan dalam **Gambar 3**, dengan menghubungkan ujung-ujung dari empat kaki horizontal (1, 2, 3, 4) dan kaki vertikal (5) dengan garis tak terlihat membentuk tepian dari sebuah bentuk piramida dengan dasar segi empat, menciptakan lima bidang permukaan yang berbeda (pentahedron). Koneksi geometri yang menarik ini mengungkapkan bahwa struktur PentaPod pada dasarnya adalah pentahedron berbasis segi empat (a square -based pentahedron), menunjukkan stabilitas dan kekuatan inherennya.

2.3 Varian bentuk PentaPod

Gambar 4 menunjukkan berbagai bentuk PentaPod (PentaOcta, PentaCone, PentaSquare, dan PentaCube) dari kiri ke kanan. Setiap kaki PentaPod memiliki lubang dengan diameter paling banyak 10% dari ukuran penampang melintang kaki. Lubang ini digunakan untuk memasukkan tali pengikat yang mengamankan satu PentaPod ke PentaPod lainnya di sumbu koordinat yang sama. Metode pengikatan ini memastikan bahwa unit PentaPod terhubung dengan aman dalam arah x, y, dan z.

Variasi bentuk PentaPod ini terkait dengan proses pendaftaran paten di Indonesia. Pendaftaran paten memerlukan klaim khusus yang bertujuan untuk mencegah orang lain mengajukan paten serupa. Klaim utama menjelaskan PentaPod sebagai memiliki lima kaki yang diatur dalam struktur piramida persegi. Bagian kaki tersebut dapat memiliki berbagai bentuk poligonal, seperti lingkaran, persegi panjang, segi delapan, atau bahkan bentuk yang melebar seperti gada. Yang penting, sumbu PentaPod dapat dirancang padat atau berongga kecil,

Gambar 4. Varian bentuk PentaPod (PentaOcta, PentaCone, PentaCube dan PentaSquare)

memanjang dari timur ke barat, dari utara ke selatan, dan sepanjang sumbu vertikal. Klaim terperinci ini mempersulit orang lain untuk meniru desain hanya dengan mengubah bentuk penampang.

Perlu ditekankan bahwa penggunaan lubang di sepanjang sumbu kaki untuk pemasangan tali pada metode PentaPod menawarkan cara yang lebih aman untuk menghubungkan unit PentaPod dalam tiga arah yang berbeda: x, y, dan z. Dengan cara ini, PentaPod tidak hanya mengandalkan beratnya sendiri, tetapi juga pada berat gabungan unit yang saling terhubung, baik dalam arah horizontal maupun vertikal.

Lebih lanjut, makalah ini akan membahas bagaimana Beton Armor PentaPod dapat dianggap sebagai inovasi baru dalam konteks perlindungan pantai, dengan mengidentifikasi perbedaan signifikan antara PentaPod dan pelindung beton lainnya yang sudah ada.

2.4 Apakah PentaPod merupakan penemuan baru?

Beberapa unit pelindung beton yang digambarkan dalam **Gambar 1** dan **Gambar 2** memiliki topologi yang serupa. Misalnya, Tetrapod dan Quadripod serupa, begitupun Hexaleg dan Hexapod, Ajack dan Xblock, serta StaBar dan Dolos. Meskipun memiliki topologi yang sama, setiap jenis pelindung memiliki bentuk detail yang unik yang menjadikannya sebagai bentuk pelindung beton yang berbeda untuk perlindungan pantai. Oleh karena itu, bentuk detail spesifik itulah yang membedakan jenis pelindung beton dengan topologi yang serupa.

Alasan untuk mengklasifikasikan PentaPod sebagai penemuan baru adalah sebagai berikut. Dibandingkan dengan pelindung beton yang digambarkan dalam **Gambar 1** dan **Gambar 2**, pengamatan berikut dapat dibuat:

a. Pada **Gambar 1** dan **Gambar 2**, terdapat berbagai jenis pelindung beton yang ada dan umum digunakan untuk perlindungan pantai. Pelindung beton yang ada berbeda secara signifikan, baik dalam topologi maupun bentuk detail, dari varian PentaPod mana pun yang ditunjukkan pada **Gambar 4**.
b. Tidak ada satupun unit pelindung beton yang ada yang secara sengaja dirancang dengan lubang di sepanjang sumbu kaki pelindung untuk memasukkan tali pengikat, memastikan koneksi yang aman dari unit PentaPod di arah sumbu x, y, dan z.
c. Istilah 'PentaPod,' atau lebih tepatnya 'PentaPod Square Pyramidal (PentaPod-SP),' tidak terkait dengan unit pelindung beton mana pun yang terlihat pada **Gambar 1** dan **Gambar 2**. Ini menunjukkan bahwa nama ini belum pernah digunakan sebelumnya untuk pelindung beton.

Dengan pelindung PentaPod, pengikatan antar unit difasilitasi karena bentuk kakinya, yang secara alami sejajar dengan sumbu x, y, dan z. Dengan membuat lubang melalui kaki PentaPod dan memasang tali melalui lubang ini dalam orientasi yang berbeda, susunan PentaPod dapat dibentuk, membuat kisi dengan pengikat dipasang sepanjang sumbu kaki horizontal dan vertikal (arah x, y, dan z). Dengan demikian, tali pengikat yang

Diterima 30 Januari 2024, Direvisi 7 April 2024, Diterima untuk dipublikasikan 22 April 2024
Copyright ©2024 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2024.31.1.4

dimasukkan dalam arah vertikal tidak akan berpotongan dengan dua tali pengikat lainnya yang dimasukkan dalam arah horizontal melalui kaki 1-3 dan kaki 2-4.

Tali pengikat antara Beton Armor PentaPod dapat dibuat dari tali nilon, baja tulangan, atau sling serat baja (sling), yang lebih disukai terbuat dari bahan tahan korosi dan tahan lama. Tali pengikat di dalam lubang dapat dipatok di ujungnya atau sebagian atau seluruhnya digrouting dengan semen. Cara lain untuk mencegah karat adalah dengan memasang pipa penyambung antara ujung-ujung kaki PentaPod yang saling bersebelahan. Dengan demikian, tali pengikat yang dimasukkan dari satu ujung, setelah melalui keluar dari ujung lain, tidak pernah berpotongan dengan lubang tempat tali pengikat tersebut digrouting.

Pengenalan penggunaan PentaPod untuk Perlindungan Pantai dan Sungai menandai sebuah perkembangan penting dalam perlindungan pantai dannsungai, menawarkan solusi baru yang inovatif yang membedakannya dari solusi yang ada.

a. **Topologi dan Bentuk Unik:** Berbeda dengan varian armor yang ada, PentaPod menampilkan bentuk piramida pentahedral berbasis persegi dengan lima kaki, yang merupakan perubahan signifikan dari desain konvensional.

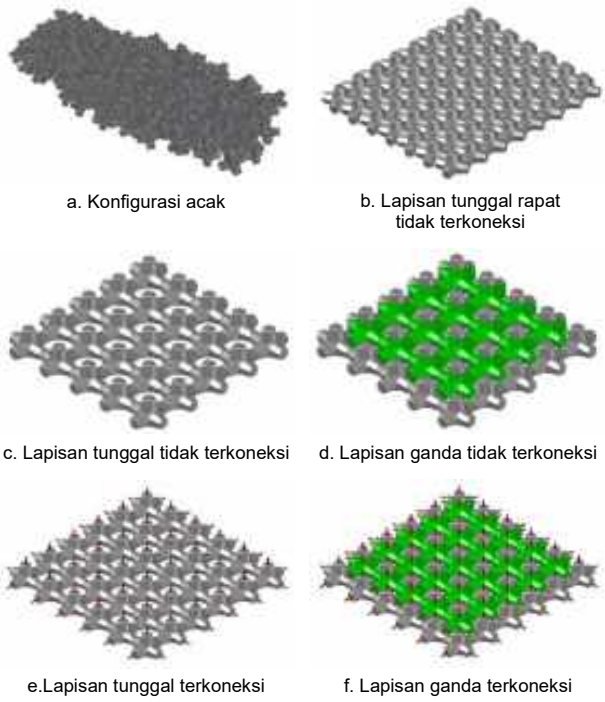
b. **Sistem Konektivitas Inovatif:** PentaPod memperkenalkan mekanisme pengikatan baru melalui lubang strategis pada kakinya, memungkinkan koneksi tali yang aman melintasi semua dimensi ruang (x, y, dan z). Sistem inovatif ini melampaui batasan metode konvensional yang bergantung pada berat dan penguncian.

c. **Nomenklatur Asli:** Nama "PentaPod" (khususnya, "PentaPod Square Pyramidal" atau PentaPod-SP) menandakan keasliannya dan tidak pernah digunakan sebagai nama dari aplikasi armor beton yang sudah digunakan sebelumnya.

2.5 Fleksibilitas penataan PentaPod untuk perlindungan pantai dan sungai

Armor Beton PentaPod menawarkan berbagai pilihan penataan, memenuhi spektrum kebutuhan perlindungan pantai dan tepi sungai. Sementara konfigurasi acak menawarkan adaptabilitas terhadap permukaan yang tidak rata, penataan teratur lebih unggul di permukaan datar atau miring berkat dasar datar yang terbentuk oleh empat kaki bawah. Pendekatan teratur ini memungkinkan pengepakan rapat untuk perlindungan maksimum atau penempatan yang lebih longgar untuk efektivitas biaya, tergantung pada kebutuhan proyek. Untuk pemasangan lapisan tunggal, PentaPod dapat dikerahkan tanpa interkoneksi (contoh di **Gambar 5.a**, **11.b**, **11.c**, dan **11.d**), lebih lanjut memungkinkan penyesuaian untuk mencapai strategi perlindungan pantai dan sungai yang optimal.

Namun, PentaPod juga dapat disusun secara teratur dalam satu atau dua lapisan (seperti di **Gambar 5.e** dan **11.f**), di mana semua unit armor dihubungkan dengan tali yang melewati lubang di kaki, baik secara



Gambar 5. Berbagai bentuk dasar pemasangan PentaPod

horizontal maupun vertikal. Ketika semua unit armor terkoneksi, stabilitas keseluruhan struktur pantai ditentukan oleh stabilitas gabungan dari unit armor yang terkoneksi ini. Hasil pengujian PentaPod Terkoneksi, yang diuji dengan arus air kuat dengan kecepatan jauh lebih besar dari pada tangki gelombang, menunjukkan bahwa tidak ada unit armor yang lepas, karena koefisien stabilitas yang sangat tinggi dari armor PentaPod Terkoneksi.

3. Uji Model Hidrolik Check Dam PentaPod

Perum Jasa Tirta II (PJT II), sebuah BUMN Indonesia, mengelola sumber daya air untuk memastikan kualitas dan pasokan air yang cukup untuk kebutuhan publik. Selain itu, mereka juga menjalankan tugas-tugas yang ditugaskan pemerintah dalam pengelolaan daerah aliran sungai. Pada tahun 2023, PJT II berencana untuk membangun beberapa check dam di sungai-sungai yang mengalir ke Waduk Saguling. **Gambar 6** menunjukkan Peta DAS Sungai Cijeruk, Ciminyak, dan Cibitung yang mengalir ke Waduk Saguling.

Gambar 6. Peta DAS Sungai Cijeruk, Ciminyak dan Cibitung yang mengalir ke Waduk Saguling

Diterima 30 Januari 2024, Direvisi 7 April 2024, Diterima untuk dipublikasikan 22 April 2024
Copyright © 2024 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2024.31.1.4

Berdasarkan analisis konsultan PT. Virama Karya, diputuskan bahwa check dam akan menjadi solusi paling efektif untuk mengatasi sedimentasi di sungai-sungai ini. Check dam konvensional diusulkan untuk dibangun di lokasi Cijeruk dan Ciminyak karena kesesuaiannya dengan kondisi spesifik di sana. Namun, di lokasi Cibitung, diusulkan pembangunan check dam yang menggunakan unit armor beton inovatif PentaPod.

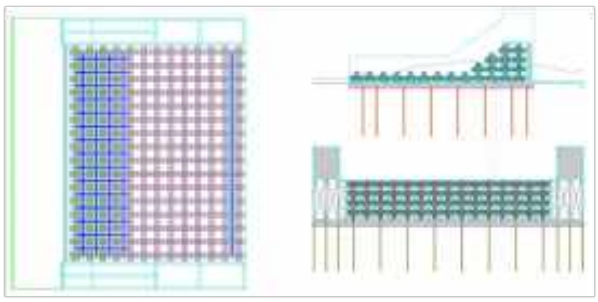
Check Dam PentaPod menggunakan unit beton pracetak baru bernama PentaPod yang dirancang untuk perlindungan pantai dan sungai. Setiap unit PentaPod memiliki lima kaki yang saling mengunci, membentuk struktur yang stabil yang mengurangi kecepatan aliran air, mengelola sedimen, dan mencegah erosi (Laporan Laboratorium Rekayasa Sungai dan Angkutan Sedimentasi, 2023).

3.1 Check dam PentaPod Cibitung

Dalam bidang teknik hidraulik, pengujian model hidraulik fisik memegang peranan penting dalam menganalisis dan memprediksi perilaku interaksi air dengan struktur seperti Check Dam. Pengujian ini membantu memastikan desain aman dan efisien di bawah berbagai kondisi aliran. Untuk Check Dam Cibitung, model fisik berskala diuji di Laboratorium Sungai dan Sedimentasi, Kampus ITB di Jatinangor. Model khusus ini memungkinkan analisis pola aliran, potensi pengikisan, dan stabilitas struktural dari desain di bawah kondisi yang terkontrol dan dapat diulang. Meskipun wawasan berharga diperoleh dari pengujian ini, penting untuk mengakui keterbatasan mereka, seperti penyederhanaan kompleksitas dunia nyata dan tantangan dalam efek skalasi.

3.1.1 Prototype Check Dam PentaPod Cibitung

Check Dam PentaPod Cibitung, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 7**, dibangun menggunakan unit PentaPod yang saling terkoneksi dengan pengikat. Check Dam memiliki ketinggian 5.0 meter dan lebar 28 meter, memiliki dua saluran pengalihan, dengan kapasitas debit gabungan sebesar 102,80 m³/detik. Saluran-saluran ini melewati empat bukaan dengan ukuran masing-masing 1m x 5m, dilengkapi dengan stoplog berukuran 1m x 4m dan pintu air berukuran 1m x 1m. Pintu air memungkinkan aliran air selama periode aliran rendah. Terbuat dari beton, struktur terdiri dari komponen-komponen seperti plat dasar, plat sisi kiri dan kanan, serta plat depan yang menghadap hulu.



Gambar 7: Denah dan potongan Check Dam Cibitung dengan fitur PentaPod-Terkoneksi

3.1.2 Prototype Check Dam PentaPod Cibitung

Pengujian model fisik Check Dam PentaPod Cibitung menggunakan skala tak terdistorsi 1:25, yang berarti skalasi geometri horizontal dan vertikal dipertahankan sama. Pendekatan ini memastikan kesamaan Froude antara model dan prototipe, yang berarti rezim aliran yang sesuai dipertahankan meskipun ada perbedaan ukuran. **Gambar 8** memperlihatkan gambar model check dam PentaPod skala 1/25 yang akan diuji secara hidrolika dengan pengskalaan yang mengikuti hukum keserupaan Froude.

3.1.3 Skala parameter hidraulik

Pengujian Model Check Dam PentaPod Skala 1:25 menggunakan hukum keserupaan Froude untuk memastikan hasil yang akurat dan dapat dikonversi ke skala nyata. Faktor skala untuk parameter hidraulik yang relevan telah dirangkum dalam **Tabel 1**. Temuan penelitian ini dapat diterapkan ke dalam desain dan implementasi Check Dam PentaPod di lapangan, memberikan wawasan teoritis dan panduan praktis yang membantu dalam desain dan konstruksi check dam yang lebih efektif dalam mengendalikan erosi dan sedimentasi di sungai.

3.1.4 Debit banjir untuk prototipe dan model skala 1:25

Model tes Check Dam PentaPod Cibitung skala 1:25 akan digunakan untuk mengevaluasi kinerja struktur di bawah berbagai skenario banjir yang dirancang untuk mewakili periode ulang banjir mulai dari 2 hingga 100 tahun. **Tabel 2** merinci debit banjir yang akan diuji dalam model, dinyatakan dalam liter/detik (l/dtk) untuk skala 1/25, dengan debit tertinggi, yaitu 44.22 l/dtk, mensimulasikan kondisi banjir 100 tahun. Model tes akan dijalankan untuk berbagai skenario banjir, dengan debit dan durasi yang berbeda, dirancang untuk mewakili berbagai kondisi yang mungkin terjadi di lapangan.

3.2 Pemasangan peralatan pengukuran

Untuk menilai kinerja check dam PentaPod di bawah berbagai kondisi aliran, variabel seperti kecepatan air dan

Gambar 8: Model check dam Cibitung skala 1/25 yang dibuat dari PentaPod-Terkoneksi

Diterima 30 Januari 2024, Direvisi 7 April 2024, Diterima untuk dipublikasikan 22 April 2024
Copyright ©2024 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2024.31.1.4

Tabel 1. Skala dimensi untuk model Chek Dam PentaPod skala 1:25

No	Parameter Hidrolik	Scale of Hydraulic Parameters		
		Faktor Skala	N = 1/25	Nilai
1	Panjang	n	$(1/25)$	0.04
2	Kecepatan	$\sqrt{n}$	$\sqrt{(1/25)}$	0.2
3	Waktu	$n^{-0.5}$	$(1/25)^{-0.5}$	0.2
4	Akselerasi	1	1	1
5	Debit	$n^{5/2}$	$(1/25)^{5/2}$	0.00032
6	Gaya	n^{3}	$(1/25)^{3}$	0.000064
7	Tekanan	n^{-01}	$(1/25)^{-01}$	25
8	Massa	n^{3}	$(1/25)^{3}$	0.000064

Tabel 2. Debit banjir dari Check Dam Cibitung untuk prototipe dan model skala 1:25

No	Return Period (Year)	Design Flood Discharge	
		Prototype (m3/s)	Model (liter/sec)
1	2	24.70	7.90
2	5	55.50	17.76
3	10	76.80	24.58
4	25	102.80	32.90
5	50	121.00	38.72
6	100	138.20	44.22

kedalaman akan diukur di titik-titik yang ditentukan dalam model. Untuk kedalaman air yang melebihi 5 cm, perangkat Flow Tracker akan digunakan untuk menangkap pengukuran kecepatan yang detail. Akan tetapi, di area yang lebih dangkal di bawah 5 cm, Alat Ukur Arus TH-02 akan digunakan karena kesesuaiannya untuk kondisi spesifik ini. Pendekatan komprehensif ini memastikan pengumpulan data yang akurat di seluruh model, memberikan wawasan berharga tentang perilaku check dam PentaPod.

3.3 Pengujian

Setiap seri pengujian dalam studi ini dirancang untuk mensimulasikan kondisi debit banjir yang sesuai dengan frekuensi kejadian banjir setiap 2, 5, 10, 25, 50, dan 100 tahun. Pengukuran inflow ke dalam sistem menggunakan metode Ambang Tajam (Suppressed Sharp Crested Weir).

Pendekatan ini dirancang untuk menjadi sangat komprehensif, memberikan kesempatan kepada para peneliti untuk melakukan evaluasi yang mendalam terhadap ketahanan dan efektivitas check dam dalam mengatasi beragam skenario hidraulik yang mungkin dihadapi. Dalam kajian ini, analisis dilakukan tidak hanya terfokus pada stabilitas struktural check dam, tetapi juga meliputi evaluasi terhadap potensi pengikisan di area sekitar dam dan penilaian terhadap integritas struktural keseluruhan dari struktur tersebut.

Dengan menerapkan metodologi yang teliti dalam menguji perilaku check dam di bawah berbagai kondisi hidraulik, penelitian ini berhasil mengidentifikasi dan mengumpulkan data berharga yang menunjukkan sejauh mana keefektifan struktur Check Dam dalam melewatkan berbagai level kejadian banjir.

3.4 Pengumpulan dan analisis data

Data yang diperoleh dari instrumen selama pengujian check dam akan direkam dan dianalisis untuk memahami pola aliran dan kecepatan air. Analisis ini juga bertujuan untuk mengidentifikasi masalah potensial seperti distribusi air yang berlebihan atau tidak merata, serta mengevaluasi kapasitas dan efisiensi check dam dalam menampung dan mengalirkan air.

Pendekatan ini memungkinkan para peneliti untuk mendapatkan pemahaman yang komprehensif tentang kinerja check dam di bawah berbagai kondisi. Hasil analisis data akan membantu dalam meningkatkan desain dan konstruksi check dam di masa depan.

3.5 Modifikasi dan optimasi:

Desain check dam dioptimalkan secara bertahap melalui serangkaian pengujian iteratif, termasuk Seri-0 yang mewakili kondisi sungai tanpa check dam, Seri-1 untuk menguji desain awal, Seri-2 yang menerapkan modifikasi berdasarkan hasil dari Seri-1, dan Seri-3 untuk memperhalus desain berdasarkan temuan dari Seri-2. Perbaikan utama meliputi meningkatkan tinggi pelat sisi kiri dan kanan serta meningkatkan tinggi platform pintu air sisi kiri dan kanan, memungkinkan identifikasi dan solusi sistematis terhadap keterbatasan kinerja di setiap iterasi. Manfaat pengujian iteratif ini termasuk peningkatan kinerja check dam secara bertahap, identifikasi dan penanganan keterbatasan desain secara sistematis, dan memastikan desain final check dam mencapai performa optimal. Kesimpulan dari proses ini menunjukkan bahwa pengujian iteratif adalah metode yang efektif untuk mengoptimalkan desain check dam, menghasilkan desain akhir yang handal dan efisien.

3.6 Ringkasan uji model hidraulik

Dokumen ini menggali kinerja model check dam Cibitung ketika dihadapkan pada debit banjir dengan kejadian ulang 25 tahun, sebagai bagian dari investigasi komprehensif yang mengevaluasi berbagai kondisi banjir melalui tiga fase pengembangan (Seri-1, 2, dan 3). Meskipun analisis yang lebih luas mencakup peristiwa banjir dengan interval kembali dari 2, 5, 10, 25, 50 dan 100 tahun, penekanan di sini adalah pada kinerja model Seri-3 selama peristiwa banjir 25 tahun, seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 9**.

Diterima 30 Januari 2024, Direvisi 7 April 2024, Diterima untuk dipublikasikan 22 April 2024
Copyright © 2024 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2024.31.1.4

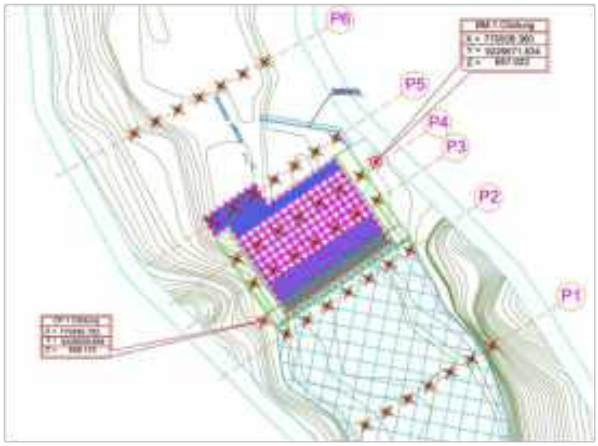
Gambar 9: Uji model hidrolik model check dam Cibitung skala 1/25 yang dibuat dari PentaPod Terkoneksi

Berkonsentrasi pada skenario khusus ini menawarkan pandangan mendalam tentang bagaimana model berperilaku di bawah tekanan yang signifikan, memberikan wawasan tentang ketahanan dan efektivitas desainnya di bawah kondisi tersebut.

3.6.1 Hasil pengukuran kedalaman dan kecepatan air seri-3

Gambar 10 menunjukkan lokasi pengukuran untuk kedalaman dan kecepatan air dalam model Seri-3, disesuaikan untuk skenario debit banjir desain yang berbeda. Sebanyak 35 titik spesifik (terdiri dari 5 garis pengukuran dengan 7 titik setiap garis) dipilih di seluruh model, mencakup area hulu dan hilir. Pengumpulan data yang ekstensif ini memungkinkan analisis mendalam tentang dinamika aliran, mengidentifikasi perubahan halus atau ketidakteraturan dalam pergerakan air. Pemeriksaan metrik ini penting untuk mengevaluasi kapasitas bendungan dalam mengelola aliran air dan mengidentifikasi bagian yang mungkin memerlukan penyempurnaan tambahan.

Tabel 3 menyajikan pengukuran kedalaman dan kecepatan aliran air di lokasi spesifik sepanjang bagian P3, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 10**. Pengukuran serupa



Gambar 10. Titik-titik pengamatan kecepatan dan kedalaman aliran pada model Check Dam.

Tabel 3. Pengukuran kedalaman dan kecepatan air seri-3 sepanjang penampang P3

Nomor Titik	Kedalaman Air (cm)		Kecepatan (m3/s)	
	Model	Prototype	Model	Prototype
1	4.7	1.18	0.106	0.530
2	6.2	1.55	0.753	3.765
3	5.3	1.33	1.214	6.069
4	5.3	1.33	0.978	4.889
5	7.4	1.85	1.191	5.957
6	7.8	1.95	0.798	3.990
7	4.3	1.08	1.180	5.901

juga diperoleh untuk bagian lain, yaitu P1, P2, P4, P5, P6, dan P7. Kumpulan data ini memungkinkan analisis komparatif antara bagian-bagian tersebut. Analisis ini penting untuk mengungkap pola, anomali, atau karakteristik khas dalam dinamika aliran air.

3.6.2 Hasil pengamatan visual seri-3

Pengamatan visual bertujuan untuk menilai secara visual bagaimana air mengalir di atas, di sekitar, dan melalui struktur model Check Dam PentaPod. Ini termasuk mengamati arah, kecepatan, dan cara gerakan air, seperti pusaran, dan pusaran kecil.

3.6.3 Tes jangkar untuk stabilitas PentaPod:

Untuk menilai efektivitas sistem penguncian dan jangkar, tes tambahan dilakukan dengan fokus pada titik jangkar kritis. Tes melibatkan pengujian struktur PentaPod yang saling terkoneksi dalam kondisi aliran yang disimulasikan sambil memvariasikan konfigurasi jangkar:

a. **Jangkar Penuh:** Dengan semua unit diamankan ke pelat dasar, sisi kiri/kanan, dan pelat depan hulu, tidak ada perpindahan yang diamati, menunjukkan integritas struktural keseluruhan.

b. **Jangkar Parsial:** Mengamankan hanya pelat dasar dan pelat depan hulu (tidak termasuk sisi kiri/kanan) masih mencegah perpindahan, menunjukkan redundansi dalam sistem.

c. **Hanya Pelat Dasar:** Mengejutkan, bahkan dengan jangkar terbatas pada pelat dasar (tidak ada pelat lain), perpindahan tetap tidak ada, menyoroti stabilitas inheren struktur yang saling terkoneksi.

d. **Tanpa Jangkar:** Namun, ketika unit hanya terkoneksi bersama tetapi tidak dijangkar ke pelat mana pun, mereka sepenuhnya tersapu, menekankan peran penting jangkar untuk stabilitas keseluruhan.

Uji jangkar menunjukkan bahwa sistem penguncian dan jangkar efektif dalam menjaga stabilitas struktur PentaPod. Bahkan dengan konfigurasi jangkar terbatas, struktur tetap stabil. Hal ini menunjukkan redundansi dalam sistem dan stabilitas inheren struktur yang saling terkoneksi. Jangkar memainkan peran penting untuk stabilitas keseluruhan, terutama dalam kondisi aliran yang tinggi.

Diterima 30 Januari 2024, Direvisi 7 April 2024, Diterima untuk dipublikasikan 22 April 2024
Copyright ©2024 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2024.31.1.4

3.6.4 Pelaporan:

Penyelesaian penyelidikan menyeluruh ini berujung pada laporan komprehensif, berjudul "Laporan Uji Model Hidrolik Check Dam Tipe PentaPod Pentasquare di Sungai Cibitung" oleh Laboratorium Rekayasa Sungai dan Angkutan Sedimentasi, FTSL-ITB, pada tahun 2023. Laporan ini secara luas mendokumentasikan metodologi yang digunakan, hasil yang diperoleh dari berbagai tes, analisis yang dilakukan, dan rekomendasi yang dihasilkan untuk desain bendungan. Selain itu, tesis Master Kiromi Syahban, (Syahban, K., 2024), lebih mendalam membahas aspek-aspek tertentu dari pengujian, menawarkan wawasan berharga untuk eksplorasi lebih lanjut.

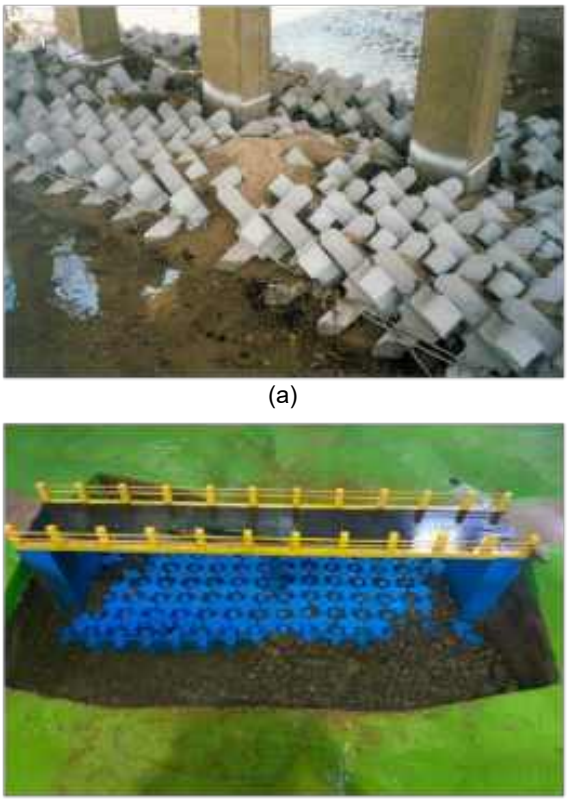
4. Aplikasi untuk *Ground Sill* dan Perlindungan Tepi Sungai

Unit armor beton konvensional seperti Tetrapod dan A-Jack telah lama diakui sebagai solusi efektif untuk melindungi pantai dari erosi dan sekarang penggunaannya semakin meluas untuk pengendalian erosi di sungai. Di tengah popularitas Tetrapod dan A-Jack, PentaPod menawarkan alternatif inovatif dengan keunggulan seperti keterkaitan antar unit yang meningkatkan stabilitas, efisiensi material yang menghemat biaya, kemampuan adaptasi yang meningkatkan fleksibilitas dan efektivitas, serta performa hidrolik yang meminimalkan refleksi gelombang dan turbulensi. PentaPod dapat digunakan untuk perlindungan pantai, pengendalian erosi sungai, pembuatan struktur pemecah gelombang yang kokoh, dan revitalisasi habitat, menawarkan solusi yang lebih efisien dan ramah lingkungan dalam menjaga keharmonisan antara kegiatan manusia dan lingkungan alam sekitar.

4.1 Perlindungan pilar jembatan

Gambar 11 menyajikan analisis perbandingan dua sistem untuk perlindungan pilar jembatan: sistem A-Jack dan sistem Pentapod. Sistem A-Jack dipilih untuk perbandingan karena telah digunakan untuk perlindungan pilar jembatan. Seperti yang digambarkan pada **Gambar 11.a**, unit beton A-Jack membungkus pilar jembatan dengan tambahan penguatan kabel baja yang dibungkus di luar. Kombinasi unit beton A-Jack dan kabel baja memberikan mekanisme perlindungan lapis ganda. Selain itu, desain sistem A-Jack memfasilitasi aliran air di sekitar pilar jembatan, mengurangi risiko scour—masalah umum yang dapat mengganggu fondasi struktur jembatan.

Sebaliknya, **Gambar 11.b** menyoroti sistem Pentapod, yang menggunakan pendekatan yang lebih teratur dan sistematis untuk perlindungan jembatan. Unit Pentapod diikat bersama dengan ikatan logam yang diposisikan di dalam, yang tidak hanya meningkatkan integritas struktural tetapi juga menawarkan solusi yang estetis menarik. Selain itu, Pentapod memperluas langkah perlindungannya ke dasar sungai dengan penciptaan Groundsill PentaPod, menangani masalah erosi dan ekologi. Metode ini menyediakan perlindungan kuat untuk infrastruktur sambil juga mengutamakan harmoni lingkungan dan daya tarik visual, menggambarkan pendekatan menyeluruh terhadap estetika rekayasa dan desain.



(a)

(b)

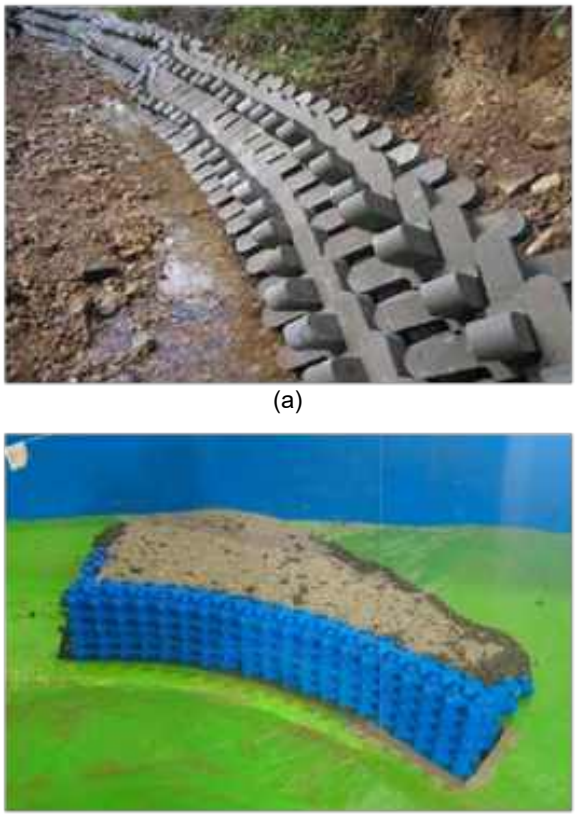
Gambar 11. Perlindungan pilar jembatan menggunakan A-Jacks dan PentaPods Terkoneksi.

4.2 Perlindungan tepi sungai

Gambar 12 menyelidiki dua metodologi berbeda untuk memperkuat tepian sungai: sistem A-Jack dan sistem Pentapod. Pemeriksaan sistem A-Jack dalam **Gambar 12.a** mengungkapkan struktur yang pada pandangan pertama, menawarkan perlindungan solid terhadap erosi. Sistem ini, setelah diperiksa lebih dekat, tidak hanya tentang menawarkan penghalang terhadap erosi tetapi tentang mengintegrasikan dengan dinamika alami tepi sungai untuk memberikan perlindungan berkelanjutan. Desain struktural sistem A-Jack dirancang untuk menyerap dan meredam energi air yang mengalir, sehingga mengurangi gaya erosi yang mengancam stabilitas tepi sungai. Susunan dan pilihan material konstruksinya krusial dalam mencapai tujuan ini, memastikan sistem dapat bertahan dalam berbagai kondisi lingkungan seiring waktu.

Gambar 12.b menampilkan sistem Pentapod, yang ditandai dengan susunan yang teratur dan kompak yang meningkatkan perlindungan tepi sungai. Pentapods dirancang dengan penjajaran vertikal untuk meminimalkan jejak ruang, sambil memastikan stabilisasi yang kuat. Unit-unit dihubungkan secara vertikal dan dijangkar dengan aman ke grid dasar, yang dipasang sejajar dan tegak lurus terhadap aliran air, sebelum dikencangkan ke tepi sungai itu sendiri. Pendekatan inovatif ini tidak hanya memperkuat

Diterima 30 Januari 2024, Direvisi 7 April 2024, Diterima untuk dipublikasikan 22 April 2024
Copyright © 2024 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2024.31.1.4



(a)

(b)

Gambar 12. Perlindungan tepi sungai menggunakan A-Jacks dan PentaPod Terkoneksi

stabilitas tepi sungai tetapi juga meminimalkan pemakaian ruang.

5. Pengujian Model Numerik

Setelah berhasil menyelesaikan pengujian model hidrolik fisik di laboratorium sungai (seperti dijelaskan di bagian sebelumnya), bagian ini membahas tentang pemodelan numerik Check Dam PentaPod menggunakan perangkat lunak Flow3D. Flow3D adalah perangkat lunak CFD (Computational Fluid Dynamics) yang dirancang khusus untuk mensimulasikan aliran permukaan bebas yang kompleks (Flow3D website), seperti yang terjadi di sekitar Check Dam PentaPod. Kemampuannya yang melampaui CFD tradisional, termasuk pelacakan permukaan bebas dan model turbulensi canggih, memungkinkan analisis terperinci tentang transportasi sedimen, transfer panas, dan interaksi multiphase (Flow3D user manual).

Pendekatan pemodelan numerik ini menawarkan beberapa keunggulan menarik. Pertama, ia memberikan fleksibilitas dan skalabilitas yang luar biasa, memungkinkan analisis berbagai geometri bendungan dan kondisi aliran (misalnya, perbedaan tinggi bendungan, laju aliran hulu) tanpa keterbatasan waktu dan sumber daya yang terkait dengan rekonstruksi model fisik. Kedua, pemodelan numerik memungkinkan investigasi detil tentang pola aliran internal dan gaya dalam struktur bendungan, seperti distribusi tekanan dan aliran air pori, yang bisa sulit atau tidak mungkin diukur langsung dalam model fisik. Selain itu, kemajuan dalam kekuatan komputasi dan kemampuan perangkat lunak menjadikan pemodelan numerik sebagai alat yang semakin hemat biaya dan mudah diakses, memperkuat posisinya sebagai pelengkap berharga untuk upaya pengujian fisik.

5.1 Geometri model

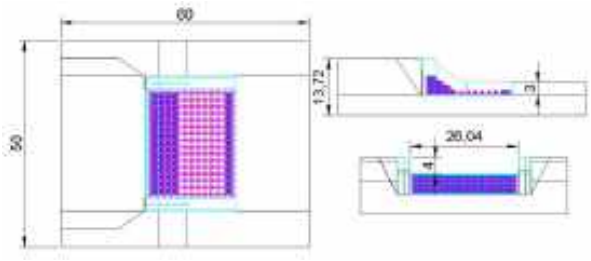
Geometri model dalam Flow3D adalah representasi digital dari struktur atau fenomena yang akan disimulasikan, mencakup desain objek, zona perhitungan, kondisi batas, dan pembagian mesh. Ini fundamental dalam menentukan perilaku fluida dan interaksinya dalam simulasi, mempengaruhi akurasi dan efisiensi perhitungan. Geometri harus akurat untuk hasil simulasi yang valid.

Pada **Gambar 13**, ditampilkan denah dan potongan dari Check Dam PentaPod. Objek yang dimodelkan memiliki spesifikasi sebagai berikut: lebar 56 meter dan panjang 60 meter. Lebar mercu (bagian atas bendungan di mana air melimpah) adalah 26.04 meter. Tinggi pelimpah dari lantai muka tercatat sebesar 5.0 meter, sementara tinggi ruang bebas di atas pelimpah hingga lantai beton pintu adalah 4.0 meter. Dengan demikian, tinggi dari lantai muka ke lantai atas pengatur pintu adalah 9.0 meter. Terakhir, tinggi dinding pembatas antara ruang olak (ruang untuk menenangkan air) dan saluran pengelak ditentukan sebesar 3.0 meter.

Gambar 14 menyajikan representasi geometri Check Dam PentaPod secara visual. Desain ini dikembangkan berdasarkan gambar denah dan potongan Check Dam PentaPod di Sungai Cibitung, sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 13**. Gambar ini menggambarkan secara detail konfigurasi konstruksi dan susunan Check Dam PentaPod yang telah direncanakan. Warna merah dan biru menandakan unit armor PentaPod yang saling terkoneksi, dengan warna hijau menunjukkan plat beton untuk penjangkaran tali pengikat PentaPod. Model geometri ini, yang disiapkan secara presisi, akan diutilisasi sebagai fondasi dalam pembentukan grid untuk simulasi Flow3D.

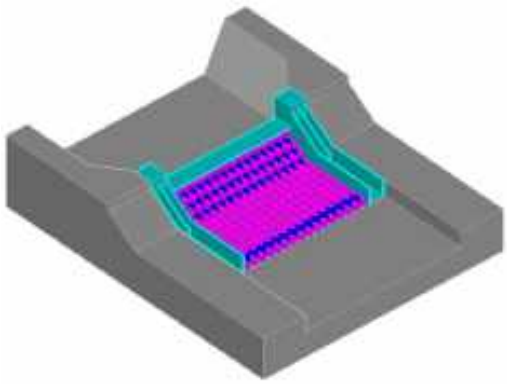
5.2 Grid model

Yang dimaksud dengan grid model ini adalah proses pembagian geometri model menjadi elemen-elemen kecil, yang biasa disebut sel atau volume kontrol, di mana persamaan aliran fluida akan diselesaikan secara numerik. Dalam pemodelan yang disebutkan, digunakan dimensi ruang kartesian dengan besaran grid

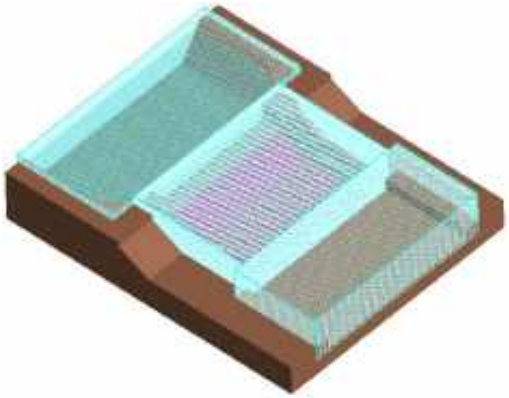


Gambar 13. Denah dan potongan Check Dam PentaPod Cibitung

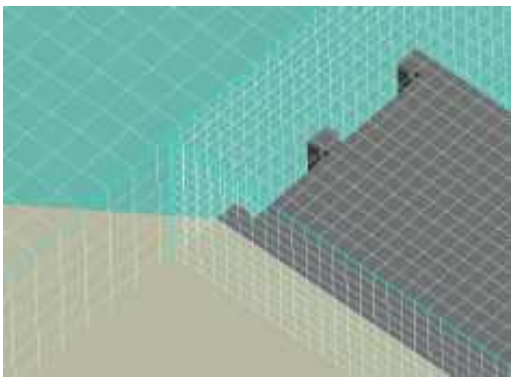
Diterima 30 Januari 2024, Direvisi 7 April 2024, Diterima untuk dipublikasikan 22 April 2024
Copyright ©2024 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2024.31.1.4



Gambar 14. Geometri model 3D Check Dam PentaPod di sungai Cibitung



(a)



(b)

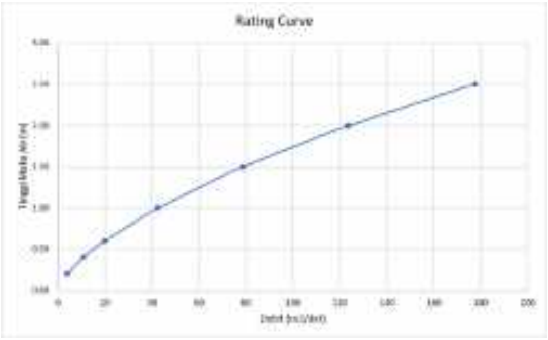
Gambar 15. Grid model 3D Check Dam PentaPod di sungai Cibitung

pada model sebesar 0.4 meter (kubus) untuk area genangan dan area hilir aliran, sementara untuk area pelimpah dan ruang olak, digunakan grid dengan ukuran 0.2 meter (kubus).

Mesh atau grid yang lebih halus, yaitu dengan elemen yang lebih kecil, dapat meningkatkan akurasi simulasi karena dapat merepresentasikan detail geometri dan gradien variabel fisik dengan lebih baik. Namun, penggunaan mesh yang lebih halus juga memerlukan lebih banyak sumber daya komputasi, termasuk waktu dan memori, karena jumlah total elemen yang harus dihitung menjadi lebih banyak.

5.3 Syarat batas

Syarat batas ditentukan oleh elevasi dan kecepatan muka air di hulu pelimpah. Setiap pengguna Flow3D mungkin memiliki metode khusus untuk mengonfigurasi ini. Langkah yang diambil di sini adalah membuat kurva kapasitas untuk mercu check dam menggunakan Flow3D. Kemudian, debit di hulu dan elevasi ditetapkan berdasarkan kurva kapasitas pelimpah tersebut.



Gambar 16. Lengkung debit pelimpah Check Dam

5.4 Waktu simulasi

Untuk setiap debit banjir rencana, simulasi menggunakan mode Flow3D dilakukan selama waktu 50 detik dengan satuan fraksi sebanyak 100 timestep. Durasi perhitungan ini sudah cukup untuk mencapai konvergensi perhitungan.

5.5 Hasil pengujian model numerik

Meskipun pemodelan numerik menghasilkan banyak output perhitungan, studi ini berfokus pada pemantauan beberapa variabel penting untuk memahami kinerja Check Dam PentaPod:

a. **Kondisi Awal:** Menentukan kondisi awal fluida dalam seluruh domain simulasi. Ini berarti fluida diam (kecepatan nol di mana-mana) dengan elevasi muka air ditentukan setinggi level tertentu diatas mercu pelimpah.

b. **Distribusi kecepatan:** Menganalisis pola aliran air di seluruh struktur bendungan, membantu mengidentifikasi risiko erosi dan area konsentrasi energi tinggi. Informasi ini penting untuk memastikan stabilitas jangka panjang bendungan dan mencegah erosi. Contoh hasil distribusi kecepatan ditunjukkan pada **Gambar 17**

c. **Elevasi Permukaan air:** Menilai bagaimana kedalaman air berubah di seluruh struktur bendungan mengungkap efektivitasnya dalam mengatur aliran dan mencegah banjir hulu. Memahami variasi ini penting untuk mengoptimalkan desain dan operasi bendungan untuk mitigasi banjir. Contoh hasil perhitungan elevasi muka air ditunjukkan pada **Gambar 18**

d. **Bilangan Froude:** Parameter tak berdimensi ini membantu mengidentifikasi area di mana aliran air

Diterima 30 Januari 2024, Direvisi 7 April 2024, Diterima untuk dipublikasikan 22 April 2024
Copyright © 2024 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2024.31.1.4

bertransisi dari subkritis ke superkritis, berpotensi menyebabkan disipasi energi. Menganalisis transisi ini penting untuk memprediksi risiko kavitasi dan erosi, penting untuk keamanan dan umur panjang bendungan. Contoh hasil perhitungan biilangan Froude ditunjukan apad **Gambar 19**

e. **Garis Aliran:** adalah representasi visual dalam dinamika fluida yang menunjukkan arah dan pola aliran fluida, dengan setiap titik pada garis mengindikasikan arah kecepatan fluida. Ini memvisualisasikan lintasan partikel fluida dalam aliran. Contoh hasil perhitungan Garis aliran ditunjukkan pada **Gambar 20**

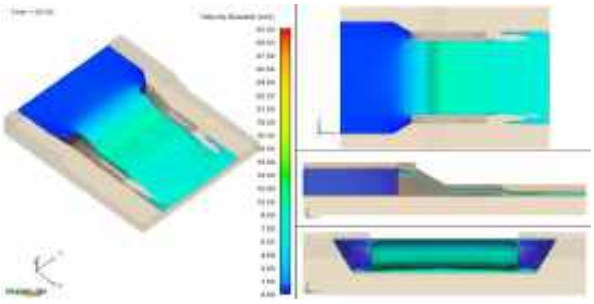
f. **Perbandingan Hasil:** Hasil perhitungan numerik kemudian dibandingkan dengan hasil pemodelan fisik. Sebagai contoh, perbandingan Kecepatan Air Seri-3 sepanjang pertengahan penampang pada Ruas Probe 1, Probe 2, Probe 3, dan Probe 4 yang ditunjukkan pada **Gambar 10**, disajikan pada **Gambar 21**. Hasil ini menunjukkan ksesuaian yang baik antara model fisik dan model numerik.

5.6 Perbandingan cara pemasangan Tetrapod dan PentaPod

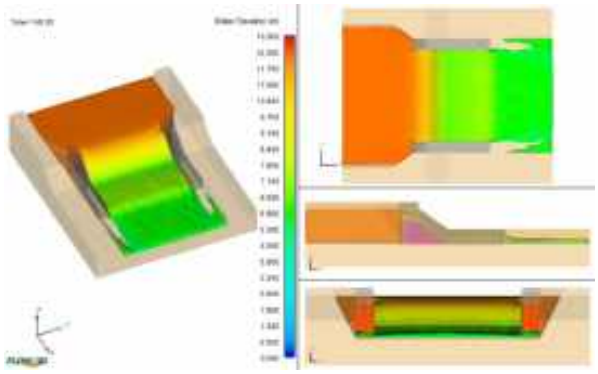
Dalam bagian sebelumnya, penggunaan PentaPod dalam pembangunan check dam, perlindungan pilar jembatan, pembangunan ground sills, dan penguatan tanggul sungai telah didemonstrasikan, menunjukkan keberagamannya untuk berbagai aplikasi terkait sungai.

Bagian berikutnya berfokus pada presentasi penggunaan PentaPod dalam mekanisme perlindungan pantai. Publikasi awal mengenai aplikasi PentaPod untuk perlindungan pantai dipresentasikan pada Pertemuan Ilmiah Tahunan HATHI-40 di Bandar Lampung (Natakusumah, D.K., Achiari, H., Nugroho, E.O., et al., 2023) dan kemudian diterbitkan secara formal dalam Jurnal Sumber Daya Air oleh HATHI (Natakusumah, D.K., Achiari, H., Nugroho, E.O., et al., Desember 2023). Rujukan utama dari kedua makalah tersebut adalah tesis magister oleh Jonathan A. Iskhaputra (2023) dan Syarif Hidayat (2023).

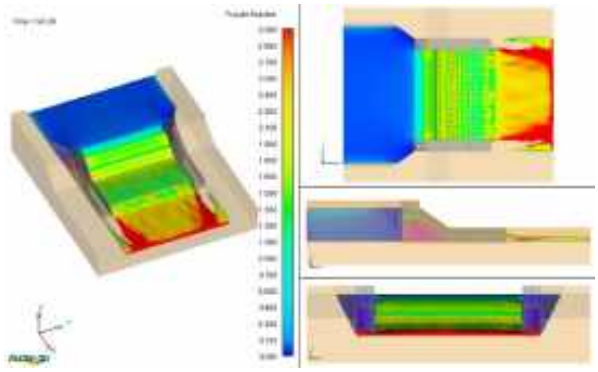
Dalam artikel yang diterbitkan di Jurnal Sumber Daya Air, berbagai gambar yang membandingkan metode pemasangan Tetrapod dan PentaPod ditampilkan. Namun, karena pembatasan jumlah halaman menjadi hanya 12 halaman, diskusi tersebut terbatas pada penyajian gambar. Artikel ini bertujuan untuk mengisi kekosongan tersebut dengan menyediakan analisis



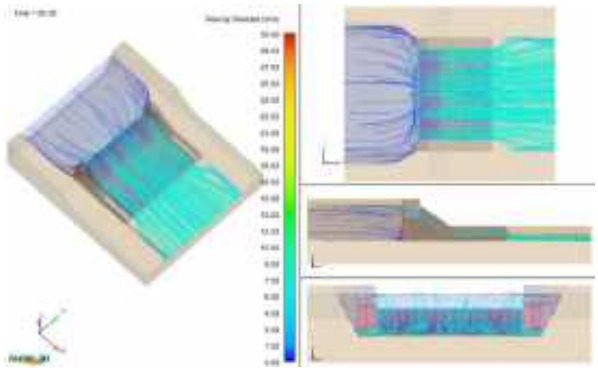
Gambar 17. Distribusi kecepatan



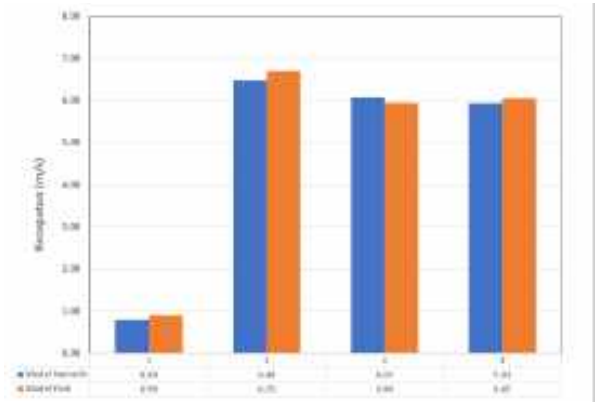
Gambar 18. Elevasi permukaan air



Gambar 19. Bilangan Froude



Gambar 20. Garis aliran



Gambar 21. Perbandingan kecepatan model numerik dan model fisik

Diterima 30 Januari 2024, Direvisi 7 April 2024, Diterima untuk dipublikasikan 22 April 2024
Copyright ©2024 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2024.31.1.4

komparatif mengenai metode pemasangan kedua jenis armor beton tersebut, khususnya dalam konteks perlindungan pantai.

Gambar 22, secara khusus membandingkan metode pemasangan masing-masing, memberikan pandangan tentang keunggulan dan karakteristik unik dari teknologi PentaPod. Analisis ini menekankan keefektifan PentaPod sebagai strategi inovatif dalam perlindungan pantai dan sungai, mengeksplorasi potensi teknologi ini dalam mengatasi berbagai tantangan yang dihadapi dalam pelestarian lingkungan pantai dan pengendalian erosi sungai.

TetraPod (P. Danel dan P.A. d'Auriac, 1950) vs **PentaPod** (D.K. Natakusumah, 2023)

Gambar 22: Perbandingan unit Armor Beton Tetrapod dan Pentapod.

- **TetraPod** (Pierre Danel dan Paul Anglès d'Auriac, 1950), memiliki bentuk piramida tetrahedral unik dengan empat kaki. Setiap kaki memiliki bentuk silinder memanjang dengan ujung bulat yang memfasilitasi interlocking dasar saat unit dirakit. Meskipun konfigurasi ini tidak menjamin keterkoneksian yang seragam. Hal ini membuat TetraPod menjadi pilihan yang menguntungkan untuk membangun pemecah gelombang dan berbagai perlindungan pantai (Wikipedia contributors (diakses 2024). Tetrapod)
- **PentaPod** (D.K. Natakusumah, 2023), struktur lima kaki, menggunakan piramida pentahedral untuk stabilitas inheren dan koneksi antar-unit yang kuat. Lubang yang ditempatkan secara strategis pada setiap kaki memungkinkan ikatan tambahan, lebih memperkuat struktur. Dioptimalkan untuk penyerapan energi gelombang dan stabilitas maksimum.

5.7 Pemasangan acak

Sebuah studi yang membandingkan konfigurasi lapis tunggal dari TetraPods dan PentaPods seperti ditunjukkan pada **Gambar 23** menunjukkan potensi untuk penempatan mereka di area. Tata letak TetraPods seperti digambarkan pada **Gambar 23**.a menunjukkan kemampuan adaptasi mereka untuk penempatan, karakteristik yang juga diamati dalam opsi pengaturan PentaPods yang diilustrasikan pada **Gambar 23**.b. Pemeriksaan ini menekankan kemudahan membangun kedua jenis dalam formasi di sepanjang wilayah.

(a)

(b)

Gambar 23. Pemasangan acak Tetrapod dan PentaPod

Dari hasil perbandingan nilai Kd Pentapod dan Tetrapod dalam Jurnal Sumber Daya Air oleh HATHI (Natakusumah et al., 2023), terbukti bahwa Pentapod memiliki nilai Kd yang lebih tinggi pada pemasangan random. Hal ini menunjukkan bahwa Pentapod memiliki stabilitas yang lebih baik dibandingkan Tetrapod ketika dipasang secara acak. Stabilitas yang lebih tinggi menjadikan Pentapod sebagai pilihan yang lebih baik untuk mengatasi dampak gelombang dan erosi dalam strategi perlindungan pantai. Efisiensi pengepakan random Pentapod, seperti yang dianalisis dalam **Gambar 23**, menunjukkan potensi evolusi dalam pendekatan perlindungan pantai, dengan Pentapod menawarkan keunggulan dalam hal stabilitas.

5.8 Pemasangan lapis tunggal padat

Studi ini menggali pengerahan TetraPods dan PentaPods dalam konfigurasi lapis tunggal seragam, seperti digambarkan pada **Gambar 24**. Kedua jenis efektif untuk perlindungan pantai, namun mereka menunjukkan perbedaan yang mencolok dalam hal estetika dan kemudahan perencanaan. TetraPods, seperti ditunjukkan pada **Gambar 24**.a, memiliki penampilan khas karena bentuknya yang tidak teratur, yang menimbulkan kesulitan dalam menghitung dan merencanakan penempatan unit individu secara akurat.

Sebaliknya, PentaPods, yang diilustrasikan pada **Gambar 24**.b, menawarkan tata letak yang lebih teratur yang memungkinkan identifikasi jelas setiap unit. Karakteristik ini sangat memudahkan proses penghitungan dan meningkatkan presisi perencanaan penyebaran dalam suatu area, keunggulan yang tidak dimiliki oleh pengaturan TetraPod.

Diterima 30 Januari 2024, Direvisi 7 April 2024, Diterima untuk dipublikasikan 22 April 2024
Copyright © 2024 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2024.31.1.4

(a)

(b)

Gambar 24. Pemasangan lapis tunggal padat Tetrapod dan PentaPod

5.9 Pemasangan lapis tunggal longgar

Gambar 25 menggambarkan penerapan TetraPods dan PentaPods dalam pengaturan lapis tunggal yang cocok untuk area pantai datar. Pengaturan yang digambarkan pada **Gambar 25.a** melibatkan TetraPods, yang, karena kaki dasar segitiga mereka, menimbulkan kesulitanuntuk mencapai tata letak seragam, sehingga mempersulit penghitungan dan perencanaan yang tepat. Karakteristik TetraPods ini menyoroti pentingnya mempertimbangkan kompatibilitas geometris dalam desain struktur perlindungan pantai.

Sebaliknya, **Gambar 25.b** menampilkan bagaimana PentaPods dirancang untuk koneksi horizontal di sepanjang sumbu x dan y, tanpa kemampuan untuk pengikatan vertikal. Fitur khas dari pengaturan ini adalah penciptaan ruang persegi antara empat kaki PentaPod yang saling terkoneksi, yang berfungsi sebagai lokasi ideal untuk penanaman mangrove. Desain inovatif ini tidak hanya menyediakan perlindungan pantai yang kokoh tetapi juga mendukung pelestarian ekologis dengan memfasilitasi ekosistem mangrove. Sistem PentaPod mencontohkan pendekatan progresif dalam perlindungan pantai, menggabungkan infrastruktur "abu-abu" yaitu warna dari beton tradisional dengan keberlanjutan lingkungan "hijau" yaitu warna tumbuhan, sehingga menunjukkan keberagamannya dan komitmen terhadap pertimbangan ekologis dalam pengelolaan pantai.

5.10 Pemasangan lapis ganda padat

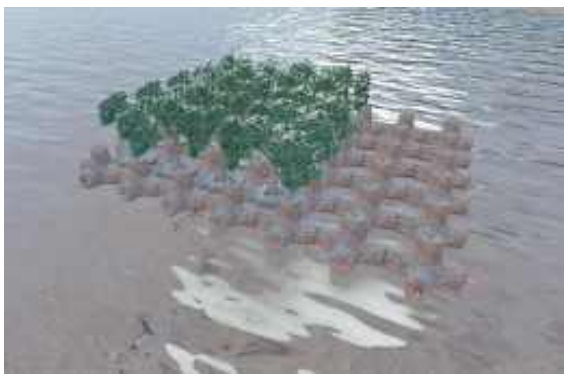
Gambar 26 menawarkan perbandingan sisi demi sisi dari TetraPods dan PentaPods yang diatur dalam formasi lapis ganda padat yang disesuaikan untuk dataran pantai datar. Pada **Gambar 26.a**, TetraPods diatur dalam lapis ganda yang kohesif, menunjukkan bagaimana desain mereka, meskipun dengan bagian segitiga bawah yang lebih rendah, masih memungkinkan penghitungan yang teratur dan penempatan strategis. Kasus ini mengungkapkan kemampuan TetraPods untuk diatur secara efektif untuk perlindungan pantai.

Sebaliknya, **Gambar 26.b** menyoroti pengaturan PentaPods dalam pola lapis ganda padat. Bentuk geometris khusus mereka memungkinkan penempatan yang menyederhanakan proses penghitungan setiap unit dan memastikan alokasi mereka yang tepat dalam ruang yang ditentukan. Setiap PentaPod diposisikan untuk tetap terpisah dari tetangganya, menekankan peran pertimbangan geometris dalam meningkatkan efisiensi pengaturan dan kesederhanaan perencanaan untuk Pemasangan perlindungan pantai dalam konfigurasi lapis ganda.

5.11 Pemasangan multi-lapis padat

Gambar 27 membandingkan konfigurasi TetraPod dan PentaPod untuk zona pantai dangkal. Sementara **Gambar 27.a** menampilkan TetraPods dalam pengaturan multi-lapis dengan jumlah unit yang berkurang per lapisan, juga mengungkapkan kelemahan signifikan: lapisan dasar yang membesar dengan meningkatnya kedalaman air. Jejak kaki yang membesar ini memerlukan lebih banyak material dan dapat merepotkan di ruang pantai yang sempit.

(a)



(b)

Gambar 25. Pemasangan lapis tunggal longgar Tetrapod dan PentaPod

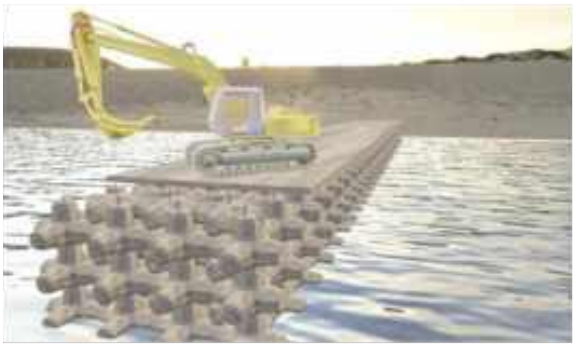
Diterima 30 Januari 2024, Direvisi 7 April 2024, Diterima untuk dipublikasikan 22 April 2024
Copyright ©2024 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2024.31.1.4

(a)

(b)

Gambar 26. Pemasangan lapis ganda padat Tetrapod dan PentaPod

(a)



(b)

Gambar 27. Pemasangan lebih dari dua lapis Tetrapod dan PentaPod

Sebaliknya, **Gambar 27.b** menampilkan PentaPods dengan dimensi seragam di semua lapisan, mencapai penguncian yang aman dan integrasi vertikal ke dalam fondasi. Desain ini menghilangkan masalah dasar yang membesar dan menawarkan penggunaan material yang efisien. Selain itu, bagian bawah yang lebih rendah berkumpul untuk membentuk platform untuk penempatan pelat, mengubah lapisan menjadi ruang kerja yang dapat digunakan dan memungkinkan penempatan mesin berat untuk Pemasangan PentaPod, meningkatkan efisiensi operasional di area pantai dangkal. Oleh karena itu, meskipun TetraPods beradaptasi dengan kedalaman yang bervariasi, dasar yang membesar mereka menunjukkan kerugian praktis dibandingkan dengan desain PentaPod yang seragam dan hemat ruang.

6. Kesimpulan

Kesimpulan dari makalah ini menggarisbawahi peran penting PentaPod dalam evolusi perlindungan pantai. Berbeda dengan unit armor beton konvensional yang terbatas oleh berat individu dan penempatan yang tidak teratur, PentaPod memperkenalkan elemen transformasi signifikan: **INTERKONEKSI**. Sistem pipa internal dan tali ini mengintegrasikan unit-unit individu menjadi struktur yang terkoordinasi, meningkatkan stabilitas dan membuka peluang baru untuk pengurangan ukuran serta penyederhanaan proses pemasangan. Inovasi ini terwujud dalam beberapa aspek kunci:

1. **Desain dan Susunan:** Karakteristik unik PentaPod, dengan empat kaki horizontal dan satu kaki vertikal yang membentuk piramida pentahedral berbasis persegi, memungkinkan penataan baik secara acak maupun teratur. Lubang yang ditempatkan secara strategis memfasilitasi penggunaan tali pengikat untuk meningkatkan stabilitas, menawarkan fleksibilitas sesuai dengan kebutuhan proyek.
2. **Interkoneksi dan Stabilitas:** Inti dari kekuatan PentaPod adalah dalam desain keterkaitannya, yang memperkuat stabilitas ketika unit dipasang dalam susunan teratur. Baik dengan atau tanpa koneksi tali, tergantung aplikasi, desain ini menjamin kinerja optimal tanpa mengorbankan kemampuan adaptasi.
3. **Perencanaan dan Penempatan yang Efisien:** Desain geometris memudahkan perhitungan jumlah unit dan memungkinkan perencanaan penempatan yang akurat. Selain itu, penggunaan tali pengikat mempermudah pemasangan pada berbagai jenis permukaan dan lingkungan akuatik, meningkatkan kegunaan sistem PentaPod dalam perlindungan sungai dan pantai.
4. **Fleksibilitas Pemasangan:** Pemasangan acak mengeliminasi kebutuhan akan lubang dan interkoneksi, menawarkan solusi yang ekonomis untuk berbagai proyek. Metode ini cocok untuk situasi di mana stabilitas unit individu sudah memadai.
5. **Efisiensi Biaya dan Keberlanjutan:** Pemasangan teratur tanpa pengikat mengurangi jumlah unit yang diperlukan, sehingga menghemat biaya. Pemasangan teratur dengan pengikat tidak hanya

Diterima 30 Januari 2024, Direvisi 7 April 2024, Diterima untuk dipublikasikan 22 April 2024
Copyright © 2024 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2024.31.1.4

meningkatkan stabilitas tetapi juga memungkinkan penggunaan unit yang lebih kecil, mengurangi biaya dan konsumsi material, dan mendukung pendekatan yang lebih berkelanjutan.

6. **Keselamatan Struktural yang Ditingkatkan:** Unit yang terpasang dengan aman, mulai dari pelat dasar hingga sisi dan pelat depan, memastikan stabilitas baik untuk unit individu maupun yang terhubung. Hal ini mengurangi risiko runtuh atau kerusakan akibat banjir bagi Check Dam PentaPod dan ground sill, mendukung integritas struktural dan keselamatan jangka panjang.
7. PentaPod mewakili pergeseran paradigma dalam perlindungan pantai dan sungai, menawarkan stabilitas, fleksibilitas, efisiensi biaya, dan keberlanjutan yang belum pernah ada sebelumnya. Desain yang terkoneksi membuka peluang baru untuk masa depan dalam melindungi garis pantai, menandai kemajuan besar dalam teknik pantai dan sungai. Potensi PentaPod melampaui fungsionalitas, memberikan solusi yang lebih bertanggung jawab terhadap lingkungan untuk melindungi garis pantai dan tepian sungai yang berharga.

Ucapan Terima Kasih:

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Muhammad Asad dan tim di Laboratorium Teknik Kelautan untuk peran mereka yang krusial dalam kesuksesan pengujian Pentapods menggunakan Wave Flume. Ucapan terima kasih disampaikan serupa juga ditujukan kepada Anwar Abdurahman, Darmanto Ady Saputra, Soka Wiangga, serta keseluruhan tim di Laboratorium Sungai dan Sedimentasi, termasuk teknisi Jajang, Ade Tarigan, dan Hamzah Kurniadi, atas dukungan mereka yang tidak ternilai selama proses pengujian Pentapods di wave flume dan uji model hidraulik Check Dam PentaPod di Sungai Cibitung. Kolaborasi erat antara Laboratorium Teknik Kelautan dan Laboratorium Sungai dan Sedimentasi di Kampus ITB Jatinangor telah memainkan peran penting dalam memajukan riset oleh Syarif Hidayat, Jonathan Anggelo Ishakputra dan Kiromi Syabhan mahasiswa pascasarjana dari program Magister Pengelolaan Sumber Daya Air, yang semuanya mendapat manfaat dalam mencapai keberhasilan tesis master mereka. Kesuksesan ini kemudian menjadi landasan bagi penulisan berbagai makalah yang berkaitan dengan penggunaan PentaPod.

Daftar Pustaka

Academistan. (n.d.). *Channel Morphology and Classification*. Diakses dari https://academistan.com/channel-morphology-and-classification/

Das, T. (2014). *River Bank Erosion Induced Human Displacement and Its Consequences*. Living Reviews in Landscape Research, 8. https://doi.org/10.12942/lrlr-2014-3

Doan, B., Kantoush, S., Nguyen, M., & Sumi, T. (2018). *Water level changes under increased regulated flows and degraded river in Vietnamese Mekong Delta*. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), 74. https://doi.org/10.2208/jscejhe.74.5_I_871

Dream Civil. (2024). *Check Dam: Purpose, Advantages, and Disadvantages*. Diakses dari https://dreamcivil.com/check-dam/

Hidayatulloh, S. (2023). *Penentuan Nilai KD untuk Armor Unit Tipe PentaOcta (PentaPod Tipe Octagon) Melalui Pengujian Model Fisik pada Wave Flume*. [Tesis Magister Teknik Sipil]. Institut Teknologi Bandung.

Ishakputra, J. (2023). *Penentuan Nilai KD Untuk Armor Unit Tipe Pentacone (PentaPod Tipe Conus Terpotong) Melalui Pengujian Model Fisik Pada Wave Flume*. [Tesis Magister Pengelolaan Sumber Daya Air]. Institut Teknologi Bandung.

Knighton, D. (1998). *Fluvial Forms and Processes: A New Perspective*. Arnold. Diakses dari https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9780203784662/fluvial-forms-processes-david-knighton

Laboratorium Rekayasa Sungai dan Angkutan Sedimentasi. (2023). *Laporan uji model hidraulik model check dam PentaPod tipe Pentasquare Sungai Cibitung*. Institut Teknologi Bandung.

Lal, R. (2015). *Soil erosion and its management*. CRC Press.

Natakusumah, D. K., Achiari, H., Nugroho, E. O., Hidayatulloh, S., Angelo, J., & Adinata, F. (2023, Agustus). *Pengembangan PentaPod: Armor beton jenis baru untuk pelindung bangunan pantai*. Disajikan pada Pertemuan Ilmiah Tahunan ke-40 HATHI, Bandar Lampung.

Natakusumah, D. K., Achiari, H., Nugroho, E. O., Hidayatulloh, S., Angelo, J., & Adinata, F. (2023, Desember). *Pengembangan PentaPod: Armor beton jenis baru untuk pelindung bangunan pantai.* Jurnal Teknik Sumber Daya Air, 3(2), 177-190. Diakses dari https://jtsda.hathi.id/index.php/jtsda/article/view/92

Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (n.d.). *Modul 6 morfologi sungai*. Diakses dari https://simantu.pu.go.id/epel/edok/b57b9_06._Modul_6_Morfologi_Sungai.pdf

Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegaard, K. L., Richter, B. D., ... & Stromberg, J. C. (1997). *The natural flow regime*. BioScience, 47(11), 769-784.

Reedijk, B., & Muttray, M. (2009). *Design of concrete armour layers*. Hansa International Maritime Journal, 6, 111-118. Diakses dari file:///C:/Users/62812/Downloads/2008_Design-of-

Diterima 30 Januari 2024, Direvisi 7 April 2024, Diterima untuk dipublikasikan 22 April 2024
Copyright ©2024 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2024.31.1.4

concrete-armour-layers-Muttray-et-al%20(3).pdf

Smith, P. E. (2016). *Design and specification of marine concrete structures. Di Marine concrete structures*. Diakses dari https://www.researchgate.net/publication/ 304398604_Design_and_specification_of_marine_concrete_structures

Syahban, K. (2024). *Perencanaan dan uji model fisik check dam, proteksi tebing sungai dan pelindung pilar jembatan yang terbuat dari susunan PentaPod tipe PentaSquare di Sungai Cibitung anak sungai Waduk Saguling* Tesis Magister Pengelolaan Sumber Daya Air]. Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia.

Wikipedia contributors. (2024). *Check dam*. Di Wikipedia. Diakses dari https://en.wikipedia.org/wiki/Check_dam

Wikipedia contributors (diakses 2024). *Tetrapod*. Di Wikipedia. Diakses dari https://en.wikipedia.org/wiki/Tetrapod

Wikipedia. (n.d.). *Morfologi sungai*. Diakses dari https://id.wikipedia.org/wiki/Morfologi_sungai

Diterima 30 Januari 2024, Direvisi 7 April 2024, Diterima untuk dipublikasikan 22 April 2024
Copyright © 2024 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2024.31.1.4