

## Analisis Kegagalan Dinding Turap Tipe CCSP Proyek Revetment Sungai Bengawan Solo. Studi Kasus Desa Lebaksari, Kecamatan Baureno, Bojongoro

**Ahmad Luthfi Mahfudhi\*, Trihanyndio Rendy Satrya, Noor Endah**

Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia

Email: 6012241044@student.its.ac.id\*

| <b>Keywords :</b>                                    | <b>Abstract</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Failure of Retaining Wall;<br>River Bend; Scour      | <i>The Bengawan Solo River, the longest river on Java Island, has a dynamic morphology, especially in the bend area in Lebaksari Village, Bojonegoro, where riverbank erosion continues to erode residents' agricultural land. To address this, a 980-meter-long revetment structure using CCSP sheet piles was constructed. However, just one month after construction (December 2024), the sheet pile collapsed. This study aims to analyze the causes of sheet pile failure. Under conditions of receding river water levels and eroded soil conditions, sheet piles in segments 2 and 3 collapsed. Based on calculations, the total length of sheet piles in segments 2 and 3 exceeded the total length of the existing sheet pile. The maximum moments that occurred in segments 2 and 3 also exceeded the cracking moment of the existing sheet pile. The resulting anchor force exceeded the allowable pile load, resulting in the pile uprooting. This caused the sheet pile to become unstable and fail. The scour depth was assessed based on a river cross-section. Based on the results of the calculation of scour at the foot of the retaining wall using the Hire Equation method for flood discharge <math>Q_{50}</math> and <math>Q_{25}</math>, it can be concluded that the scour depth (ys) is greatly influenced by the magnitude of the flood discharge and the elevation of the river water level.</i> |
| <b>Kata Kunci:</b>                                   | <b>Abstrak</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Kegagalan Dinding Turap;<br>Tikungan Sungai; Gerusan | Sungai Bengawan Solo sebagai sungai terpanjang di Pulau Jawa memiliki morfologi yang dinamis, terutama pada daerah tikungan di Desa Lebaksari, Bojonegoro, dimana gerusan tebing sungai terus menggerus lahan pertanian warga. Untuk mengatasi hal tersebut, dibangun struktur revetment menggunakan turap CCSP sepanjang 980 meter. Namun, hanya dalam satu bulan pasca-konstruksi (Desember 2024), turap mengalami keruntuhan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penyebab kegagalan turap. Pada kondisi muka air sungai surut dan kondisi tanah yang sudah tergerus, turap pada segmen 2 dan 3 mengalami keruntuhan. Berdasarkan hasil perhitungan, panjang total turap pada segmen 2 dan 3 melebihi panjang total turap eksisting. Momen maksimum yang terjadi pada segmen 2 dan 3 juga melebihi momen crack turap eksisting. Gaya angkur yang terjadi melebihi beban izin tiang, sehingga tiang pancang tercabut. Hal ini yang menyebabkan turap tidak stabil dan mengalami kegagalan. Kedalaman gerusan ditinjau berdasarkan cross-section sungai. Berdasarkan hasil perhitungan gerusan pada kaki turap menggunakan metode Hire Equation untuk debit banjir $Q_{50}$ dan $Q_{25}$ , dapat disimpulkan bahwa kedalaman gerusan (ys) sangat dipengaruhi oleh besarnya debit banjir dan elevasi muka air sungai.                                                                                                 |

## PENDAHULUAN

Bengawan Solo adalah sungai terpanjang di Pulau Jawa, Indonesia dengan dua hulu sungai yaitu dari daerah Pegunungan Kidul, Wonogiri dan Ponorogo, selanjutnya bermuara di daerah Gresik. Mempertimbangkan Daerah Aliran Sungai (DAS) yang sangat besar, maka debit banjir yang dihasilkan Sungai Bengawan Solo sangat besar sehingga dapat mengevolusi morfologi Sungai Bengawan Solo sepanjang tahun (Julien, 2002), utamanya lebar belokan (meander)(Toan & Duc Do, 2019). Salah satu daerah hilir yang terimbas oleh evolusi morfologi Sungai Bengawan Solo adalah Desa Lebaksari, Kecamatan Baureno, Kabupaten Bojonegoro. Daerah ini sangat rentan mengalami evolusi morfologi Sungai Bengawan Solo karena berada pada lokasi tikungan sisi luar sungai (Rahman et al., 2022). Kondisi aliran ini juga mengakibatkan endapan di bagian dalam tikungan sungai (Hill et al., 2016). Hal ini dibuktikan dari citra historis pada Gambar 1.

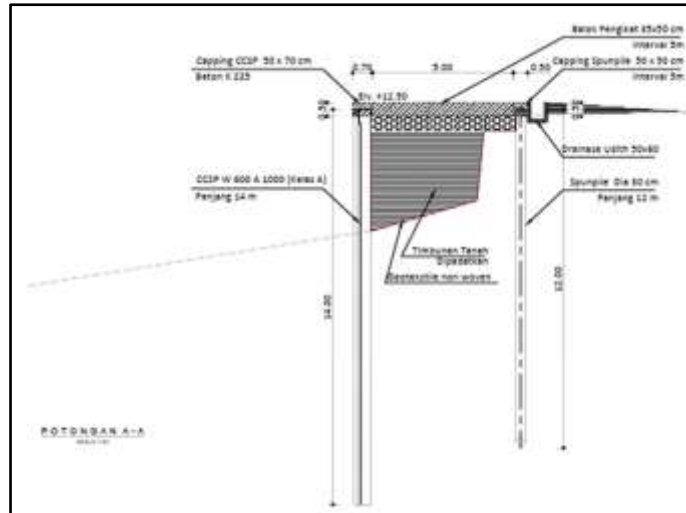
Lebar gerusan rata - rata yang terjadi dari tahun 2002 hingga 2024 mencapai 46,53 m yang diukur dengan citra satelit pada Gambar 1. Gerusan yang terjadi menggerus lahan pertanian dan lahan didekat rumah warga sehingga telah terjadi beberapa kali longsor dan dikhawatirkan akan terus merusak lahan warga.



**Gambar 1** Kondisi lebar Sungai Bengawan Solo, Desa Lebaksari, Kecamatan Baureno, Bojonegoro: (a) tahun 2002; (b) tahun 2024

Sumber: Google Earth

Mempertimbangkan kondisi tersebut, proyek pembangunan pelindung tebing Sungai dilakukan untuk menanggulangi gerusan yang terus terjadi pada belokan sisi terluar sungai. Pekerjaan turap diilustrasikan melalui gambar potongan yang ditunjukkan pada Gambar 2. Dinding pelindung menggunakan tipe turap CCSP W-600 A 1000, panjang total turap 14 meter dengan momen crack 45,4 ton.m. turap dihubungkan dengan balok pile oleh balok beton sebagai angkur dengan jarak pemasangan per 5 meteran. Desain turap tipikal sepanjang proyek revetment.



**Gambar 2** Gambar Potongan Turap

Pekerjaan turap sepanjang 980 meter dilaksanakan Bulan September 2024 dan selesai pada pertengahan Bulan November 2024 yang dapat dilihat sepanjang garis merah pada Gambar 3. Setelah konstruksi selesai, banjir terjadi dan menggerus pada beberapa titik belokan dalam jangka waktu satu bulan yaitu sekitar Bulan Desember 2024, sehingga konstruksi turap mengalami deformasi besar. Deformasi besar harus ditahan balok pengikat, namun sambungan balok dalam fungsi waktu mengalami beban tarik yang meningkat atau konstan sehingga mengalami *creep* (pelemahan)(Ali et al., 2024). Pelemahan ini akhirnya menyebabkan sambungan balok dan tiang pancang patah, dan turap mengalami kegagalan (Gambar 4). Kegagalan terjadi dengan panjang total 710 m (Gambar 3).



**Gambar 3** Kondisi Turap



(a) Selama konstruksi



(b) Pasca konstruksi (Kegagalan)



(c) Pasca konstruksi (kegagalan)

**Gambar 4** Kondisi konstruski (a) sebelum gagal; (b) dan (c) setelah gagal

Pada kondisi aktual, sebagian besar turap yang dibangun mengalami kegagalan hanya dalam waktu satu bulan pasca-konstruksi, ditandai dengan deformasi besar, patah pada sambungan balok dan tiang pancang (Putriasri et al., 2023). Dengan kondisi kegagalan turap, maka diperlukan adanya penelitian faktor penyebab kegagalan turap. Terutama pada area kegagalan merupakan area tikungan sungai (Shaheed et al., 2021).

Kebaruan penelitian ini terletak pada analisis terintegrasi antara data tanah (borehole), data hidrolika (debit banjir Q25 dan Q50), dan analisis struktur turap (panjang total, momen maksimum, gaya angkur) pada tiga segmen turap yang berbeda. Penelitian ini juga mempertimbangkan dua kondisi muka air (banjir dan surut) serta kedalaman gerusan yang terjadi pada kaki turap, yang jarang dilakukan secara simultan dalam penelitian sebelumnya. Pendekatan multi-segmen ini memungkinkan identifikasi perbedaan karakteristik kegagalan pada setiap segmen dan faktor-faktor penyebabnya. Selain itu, penelitian ini menggunakan data aktual dari lapangan yang mencakup data borehole pada tiga titik serta data cross-section sungai, sehingga analisis yang dilakukan memiliki dasar data yang kuat dan relevan dengan kondisi aktual.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penyebab kegagalan turap. Berdasarkan kondisi aktual yang ada, maka diperlukan penelitian lanjutan untuk melakukan analisis data tanah, muka air sungai, serta analisis gerusan. Dengan dilakukannya penelitian ini, diharapkan dapat menghasilkan analisis permasalahan yang akurat sesuai dengan permasalahan dan kondisi aktual yang terjadi di lapangan.

## METODE PENELITIAN

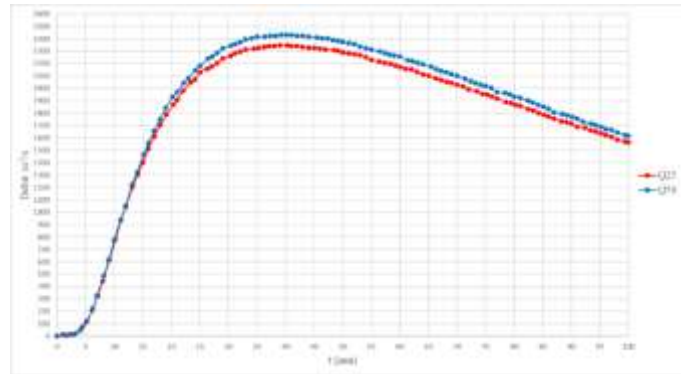


**Gambar 5** Lokasi Pengambilan Data

Data diambil di desa lebak sari, ditunjukkan pada Gambar 5. Data yang diambil berupa data borehole dan cross-section sungai. Pada area keruntuhan turap terdapat 3 borehole. Data borehole ini akan menjadi acuan untuk pembagian segmen turap. Segmen turap disesuaikan dengan cross-section sungai yang ditunjukkan pada gambar 6. Adapun data hasil analisis hidrologi berupa hidrograf debit banjir periode ulang 25 tahun (Q25) dan debit banjir periode ulang 50 tahun (Q50) gambar 7.

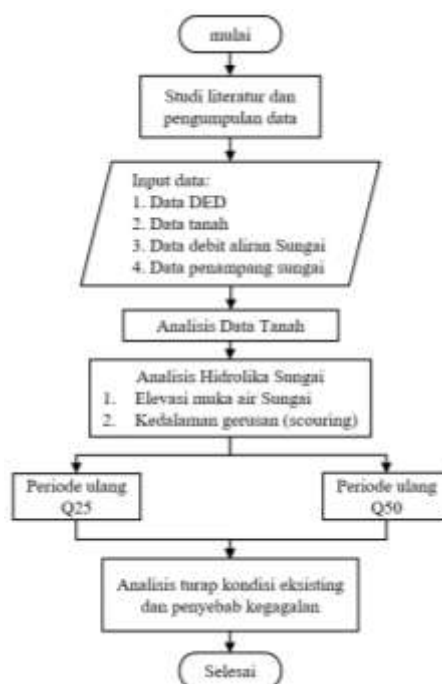


**Gambar 6** Segmen Turap Berdasarkan Cross-section



**Gambar 7** Hidrograf Banjir Q25 dan Q50

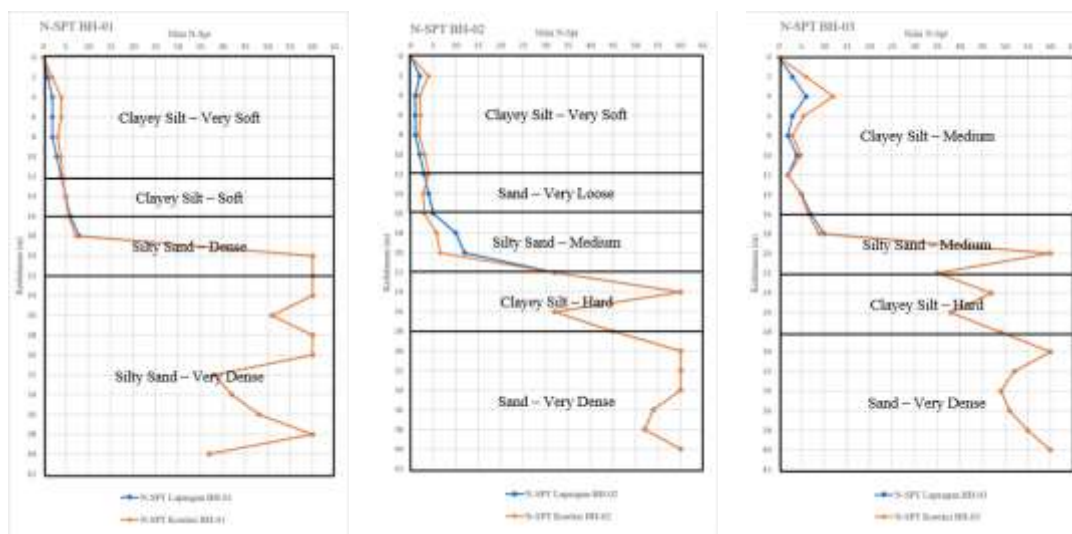
Pada periode ulang 50 tahun, debit banjir maksimum sebesar 2430 m<sup>3</sup>/detik dan debit minimum sebesar 1618 m<sup>3</sup>/detik. Sedangkan pada periode ulang 25 tahun, didapatkan debit banjir maksimum sebesar 2348 m<sup>3</sup>/detik dan debit minimum sebesar 1560 m<sup>3</sup>/detik. Penelitian ini dilakukan berdasarkan bagan alir yang ditunjukkan pada gambar 8. Penelitian ini diawali dengan studi literatur dan pengumpulan data sekunder yang meliputi Data Detail Engineering Design (DED), parameter fisik dan mekanik tanah, data debit aliran sungai, serta geometri penampang sungai. Selanjutnya, dilakukan dua tahap analisis utama. Pertama, analisis data tanah untuk menentukan karakteristik tanah. Kedua, analisis hidrolika sungai guna memperoleh elevasi muka air dan kedalaman gerusan (scouring) di sekitar struktur turap (Güneralp & Marston, 2012). Kedua analisis tersebut diterapkan pada dua skenario debit banjir dengan periode ulang, yaitu Q25 dan Q50, guna mengevaluasi pengaruh elevasi muka air sungai dan kedalaman gerusan terhadap stabilitas turap (Corney et al., 2006). Tahap akhir penelitian adalah analisis terhadap kondisi eksisting turap, yang bertujuan mengidentifikasi faktor-faktor penyebab kegagalan struktur turap.



**Gambar 8** Bagan Alir Penelitian

## Analisis Data

Berdasarkan hasil penyelidikan tanah pada 3 titik bor yaitu BH-01, BH-02, BH-03. diperoleh data jenis tanah dan nilai N-SPT sampai kedalaman 40 meter. Nilai N-SPT perlu dikoreksi dengan mempertimbangkan dua faktor utama, yaitu koreksi terhadap muka air tanah (koreksi N1) dan koreksi akibat tekanan beban di atasnya (*overburden pressure*) (koreksi N2). Koreksi karena pengaruh muka air tanah hanya berlaku untuk tanah berupa pasir halus, pasir ber lumpur, dan pasir ke lumpungan yang berada di bawah permukaan air tanah, dengan ketentuan nilai  $N > 15$  (Das, 2010). Sementara itu, untuk tanah lempung, lumpur, serta pasir kasar, atau apabila nilai  $N \leq 15$ , koreksi tidak dilakukan (Das, 2011). Hasil koreksi data N-Spt ditunjukkan pada gambar 9.



**Gambar 9** Nilai N-Spt Lapangan dan N-Spt Koreksi

Nilai hasil koreksi data tanah akan dikorelasikan untuk memperoleh berbagai parameter tanah, seperti sudut geser dalam ( $\phi$ ), kohesi ( $c$ ) berat volume tanah ( $\gamma$ ). Hasil korelasi nilai parameter tanah ditunjukkan pada tabel 1 untuk masing-masing borehole.

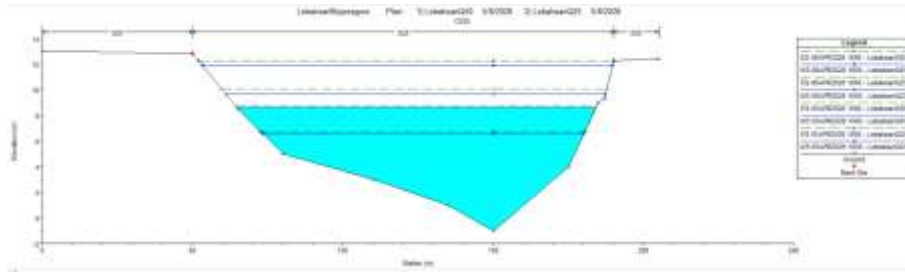
**Tabel 1** Nilai Parameter Tanah (a) segmen 1, (b) segmen 2, (c) segmen 3

| Lapisan   | Jenis Tanah dan Konsistensi | Kedalaman (m) | Tebal (m) | $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> ) | cu (KPa) | c' (KPa) | $\phi$ (°) |
|-----------|-----------------------------|---------------|-----------|-------------------------------------|--------------------------------|----------|----------|------------|
| Timbunan  | Sand                        | 0 - 6'        | 6         | 18                                  | 8                              | 0        | 0        | 30         |
| Lapisan 1 | Clayey Silt - Medium        | 6 - 16'       | 6         | 19                                  | 9                              | 35       | 23       | 0          |
| Lapisan 2 | Silty Sand - Medium         | 16 - 22'      | 6         | 20                                  | 10                             | 0        | 0        | 35         |
| Lapisan 3 | Clayey Silt - Hard          | 22 - 28'      | 6         | 22,5                                | 12,5                           | 75       | 50       | 0          |
| Lapisan 4 | Sand - Very Dense           | 28 - 40'      | 12        | 23                                  | 13                             | 0        | 0        | 42         |

a.

| Lapisan   | Jenis Tanah dan Konsistensi | Kedalaman (m) | Tebal (m) | $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> ) | cu (KPa) | c' (KPa) | $\phi$ (°) |
|-----------|-----------------------------|---------------|-----------|-------------------------------------|--------------------------------|----------|----------|------------|
| Timbunan  | Sand                        | 0 - 6'        | 6         | 18                                  | 8                              | 0        | 0        | 30         |
| Lapisan 1 | Clayey Silt - Very Soft     | 6 - 12'       | 6         | 15                                  | 5                              | 12       | 8        | 0          |





**Gambar 10** Elevasi Muka Air Sungai Berdasarkan Debit Banjir Q25 dan Q50

**Tabel 2 Elevasi Muka Air Sungai**

| Cross<br>Section | Q25         |     | Q50         |     |
|------------------|-------------|-----|-------------|-----|
|                  | Elevasi (m) |     | Elevasi (m) |     |
|                  | MAB         | MAS | MAB         | MAS |
| 13               | 10          | 6   | 12          | 9   |
| 17               | 10          | 6   | 12          | 9   |
| 20               | 10          | 7   | 12          | 9   |

Perhitungan kedalaman gerusan ( $y_s$ ) menggunakan input kecepatan debit aliran pada masing-masing cross section (Shams et al., 2002). Analisis dilakukan pada dua skenario debit banjir, yaitu debit periode ulang 50 tahun (Q50) dan 25 tahun (Q25). guna mengevaluasi kedalaman gerusan terhadap stabilitas turap pada kondisi banjir (Khassaf & Ahmed, 2021). Hasil perhitungan kedalaman gerusan pada setiap cross section nya pada kondisi debit banjir Q50 dan Q25 ditunjukkan pada tabel 2 dan tabel 3.

**Tabel 3 Kedalaman Gerusan Kondisi Debit Q50**

| Cross<br>Section | V1<br>(m/s) | g    | h1<br>(m) | Fr1   | y1<br>(m) | K1  | K2  | $y_s$ (m) |
|------------------|-------------|------|-----------|-------|-----------|-----|-----|-----------|
| 13               | 2,3         | 9,81 | 5,3       | 0,319 | 5,3       | 0,5 | 0,1 | 1,4       |
| 17               | 2,2         | 9,81 | 5,28      | 0,306 | 5,28      | 0,5 | 0,1 | 1,4       |
| 20               | 2,6         | 9,81 | 5,1       | 0,368 | 5,1       | 0,5 | 0,1 | 1,3       |

**Tabel 4 Kedalaman Gerusan Kondisi Debit Q25**

| Cross<br>Section | V1<br>(m/s) | g    | h1<br>(m) | Fr1   | y1 (m) | K1  | K2  | $y_s$<br>(m) |
|------------------|-------------|------|-----------|-------|--------|-----|-----|--------------|
| 13               | 2,3         | 9,81 | 3,3       | 0,404 | 3,3    | 0,5 | 0,1 | 0,9          |
| 17               | 2,2         | 9,81 | 3,28      | 0,388 | 3,28   | 0,5 | 0,1 | 0,9          |
| 20               | 2,6         | 9,81 | 3,1       | 0,471 | 3,1    | 0,5 | 0,1 | 0,9          |

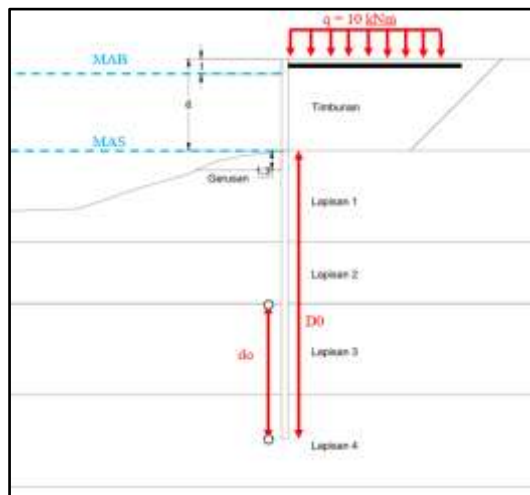
Kondisi muka air sungai dan kondisi gerusan untuk analisa penyebab kegagalan akan disesuaikan dengan segmen turap. Kondisi muka air banjir (MAB) akan diambil dari kondisi debit banjir Q50, sementara untuk kondisi muka air surut (MAS) diambil dari kondisi debit banjir Q25. Kedalaman gerusan diambil kondisi paling ekstrim yaitu pada debit banjir Q50 (Shaheed et al., 2021). kedalaman elevasi Muka Air Surut (MAS) dan Muka Air Banjir (MAB) ditinjau dari permukaan turap yang ditunjukkan pada tabel 4.

**Tabel 5 Rekapitulasi Elevasi Muka Air dan Gerusan Berdasarkan Segmen Turap**

| Segmen Turap | Bore Hole | Nomor Cross Section | Elevasi MAS (m) | Elevasi MAB (m) | Kedalaman Gerusan (m) |
|--------------|-----------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------------|
| Segmen 1     | BH-03     | 13                  | 7               | 1               | 1,4                   |
| Segmen 2     | BH-02     | 17                  | 7               | 1               | 1,4                   |
| Segmen 3     | BH-01     | 20                  | 6               | 1               | 1,3                   |

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam analisis turap, perbedaan elevasi muka air antara sisi belakang (banjir) dan sisi depan (surut) menghasilkan tekanan hidrostatik diferensial yang signifikan, di mana gaya dorong dari sisi belakang jauh lebih besar karena perbedaan tinggi muka air ( $\Delta H$ ) menciptakan distribusi tekanan yang lebih besar (Tananda et al., 2023). Kondisi ini diperparah oleh fenomena gerusan di sisi depan yang menambah kedalaman tanah, sehingga lapisan tanah yang seharusnya sebagai tahanan pasif kehilangan kapasitasnya (Arnez Ferrel et al., 2018). Selain itu, tanah di sisi belakang yang terendam banjir menggunakan berat volume jenuh ( $\gamma_{sat}$ ), yang meningkatkan tekanan tanah lateral, sementara di sisi depan pada kondisi surut, tekanan hidrostatik penahan justru berkurang. Interaksi antara perbedaan muka air juga mempengaruhi gradien hidrolik di ujung bawah turap, sehingga mengubah distribusi tekanan air pori efektif sepanjang kedalaman penetrasi (Tananda et al., 2023). Perhitungan momen turap kondisi mengacu pada angkur yang berada di kedalaman 0,5 m dari atas turap. Kondisi ini sama dengan kondisi eksisting sehingga nilai hasil perhitungan akan dibandingkan dengan hasil kondisi eksisting nya. Ilustrasi turap ditunjukkan pada gambar 11.

**Gambar 11 Kondisi Turap**

Perhitungan turap dilakukan pada segmen 1, 2 dan 3. Hal ini dibutuhkan untuk mengevaluasi penyebab kegagalan turap. Perhitungan turap yang dilakukan meliputi panjang total turap, momen maksimum, dan gaya angkur yang terjadi. Hasil perhitungan dan perbandingan dengan kondisi eksisting ditunjukkan pada tabel 6

**Tabel 6 Hasil Perhitungan Turap dan Perbandingan dengan Kondisi eksisting.**

| Segmen Turap | Data        | Panjang Total Turap (m) | Momen Maks vs Momen crack (ton.m) | Gaya Angkur per 5 m vs Beban Izin (kN) |
|--------------|-------------|-------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|
| Segmen 1     | Perhitungan | 16                      | 125                               | 1511                                   |
|              | Eksisting   | 14                      | 45                                | 1100                                   |
| Segmen 2     | Perhitungan | 25                      | 136                               | 1588                                   |
|              | Eksisting   | 14                      | 45                                | 895                                    |
| Segmen 3     | Perhitungan | 20                      | 192                               | 1876                                   |
|              | Eksisting   | 14                      | 45                                | 895                                    |

Berdasarkan hasil komparasi antara perhitungan ulang dan kondisi eksisting, dapat dipastikan bahwa turap pada Segmen 1, Segmen 2, dan Segmen 3 telah mengalami kegagalan pada berbagai aspek teknis. Pada Segmen 1, panjang turap eksisting hanya 14 meter, jauh lebih pendek dari kebutuhan desain sebesar 16 meter, sementara momen maksimum yang terjadi mencapai 125 ton.m atau hampir tiga kali lipat dari momen retak izin sebesar 45 ton.m, dan gaya angkur per 5 meter tercatat 1511 kN melampaui beban izin 1100 kN. Kondisi serupa bahkan lebih parah terjadi pada Segmen 2, di mana panjang eksisting 14 meter tidak mencukupi kebutuhan 25 meter, momen maksimum 136 ton.m melonjak drastis di atas kapasitas retak 45 ton.m, dan gaya angkur 1588 kN jauh melewati batas izin 895 kN. Sementara itu, Segmen 3 menunjukkan tingkat kegagalan paling tinggi, dengan panjang eksisting yang sama 14 meter tetapi kebutuhan desain mencapai 20 meter, momen maksimum 192 ton.m yang lebih dari empat kali kapasitas retak 45 ton.m, serta gaya angkur 1876 kN yang melampaui beban izin 895 kN hingga lebih dari 100%. Ketimpangan nilai pada ketiga parameter utama panjang turap, momen lentur, dan gaya angkur secara simultan membuktikan bahwa turap eksisting tidak lagi mampu menahan tekanan tanah aktual, sehingga telah terjadi kegagalan struktur turap, kegagalan sistem angkur akibat kelebihan beban tarik, serta kehilangan stabilitas keseluruhan dinding penahan tanah. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa turap pada Segmen 1, 2, dan 3 dalam kondisi gagal.

## KESIMPULAN

Kedalaman gerusan ditinjau berdasarkan cross-section sungai. Berdasarkan hasil perhitungan gerusan pada kaki turap menggunakan metode Hire Equation untuk debit banjir Q50 dan Q25, dapat disimpulkan bahwa kedalaman gerusan ( $y_s$ ) sangat dipengaruhi oleh besarnya debit banjir dan elevasi muka air sungai. Pada debit banjir Q50, nilai kedalaman gerusan berkisar antara 1,2 meter hingga 1,4 meter dengan rata-rata sekitar 1,33 meter, sementara pada debit banjir Q25 nilai kedalaman gerusan berkisar antara 0,8 meter hingga 0,9 meter dengan rata-rata sekitar 0,88 meter. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar debit banjir, semakin dalam gerusan yang terjadi pada kaki turap, dengan peningkatan kedalaman dari Q25 ke Q50 mencapai sekitar 0,4 hingga 0,5 meter.

Pada kondisi muka air sungai surut dan kondisi tanah yang sudah tergerus, turap pada segmen 1, 2, dan 3 mengalami keruntuhan. Berdasarkan hasil perhitungan, panjang total turap pada segmen 1, 2, dan 3 melebihi panjang total turap eksisting. Momen maksimum yang terjadi pada segmen 1, 2, dan 3 juga melebihi momen crack turap eksisting. Gaya angkur yang terjadi

melebihi beban izin tiang, sehingga tiang pancang tercabut. Hal ini yang menyebabkan turap tidak stabil dan mengalami kegagalan. Penyebab utama kegagalan turap adalah panjang total turap, momen maksimum, serta gaya angkur pada segmen 1, 2, dan 3 melebihi spesifikasi perencanaan. Hal ini yang menyebabkan turap tidak stabil dan mengalami kegagalan.

## REFERENSI

- Ali, H., Naimi, S., & Al-Janabi, A. (2024). Numerical and Experimental Analysis of Deformation in Cantilever and Anchorage Sheet Piles. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 11(1), 239–254. <https://doi.org/10.18280/mmep.110127>
- Arnez Ferrel, K. R., Kimura, I., & Shimizu, Y. (2018). Numerical modelling of cantilever failure and effect of slump blocks on meander migration. *E3S Web of Conferences*, 40, 1–8. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184003023>
- Corney, R. K. T., Peakall, J., Parsons, D. R., Elliott, L., Amos, K. J., Best, J. L., Keevil, G. M., & Ingham, D. B. (2006). The orientation of helical flow in curved channels. *Sedimentology*, 53(2), 249–257. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2006.00771.x>
- Das, B. M. (2010). *Principles of Geotechnical Engineering* (Vol. 44, Issue 8). Cengage Learning. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201>
- Das, B. M. (2011). *Geotechnical Engineering*. J.Ross Publishing. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201>
- Güneralp, I., & Marston, R. A. (2012). Process-form linkages in meander morphodynamics: Bridging theoretical modeling and real world complexity. *Progress in Physical Geography*, 36(6), 718–746. <https://doi.org/10.1177/0309133312451989>
- Hill, C., Kozarek, J., Sotiropoulos, F., & Guala, M. (2016). Hydrodynamics and sediment transport in a meandering channel with a model axial-flow hydrokinetic turbine. *Water Resources Research*, 52(2), 860–879. <https://doi.org/10.1002/2015WR017949>
- Julien, P. Y. (2002). *River Mechanics* (Vol. 11, Issue 1). Cambridge University Press. [http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484\\_SISTEM\\_PEMBETU\\_NGAN\\_TERPUSAT\\_STRATEGI\\_MELESTARI](http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETU_NGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI)
- Khassaf, S. I., & Ahmed, S. I. (2021). Development an empirical formula to calculate the scour depth at different shapes of non-uniform piers. *Journal of Physics: Conference Series*, 1973(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012179>
- Putriasri, A. E., Hermawan, Y., Amatullah, S. I., Rahmawati, A., & Sandi, C. (2023). Kajian Penanganan Gerusan pada Sungai Ciujung melalui Pemodelan Numerik. *Jurnal Teknik Sumber Daya Air*, 3(2), 129–140. <https://doi.org/10.56860/jtsda.v3i2.84>
- Rahman, S. A., Islam, M. M., Salman, M. A., & Rafiq, M. R. (2022). Evaluating bank erosion and identifying possible anthropogenic causative factors of Kirtankhola River in Barishal, Bangladesh: an integrated GIS and Remote Sensing approaches. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 7(2), 179–190. <https://doi.org/10.26833/ijeg.947493>
- Shaheed, R., Mohammadian, A., & Yan, X. (2021). A review of numerical simulations of secondary flows in river bends. *Water (Switzerland)*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/w13070884>
- Shams, M., Ahmadi, G., & Smith, D. H. (2002). Computational modeling of flow and sediment

- transport and deposition in meandering rivers. *Advances in Water Resources*, 25(6), 689–699. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00034-9](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00034-9)
- Tananda, H., Sugianto, A., & Rahardjo, P. P. (2023). Sheet Pile Failure Caused by Scouring and Sand Mining at Padang River Bank. *Indonesian Geotechnical Journal*, 2(3), 109–122. <https://doi.org/10.56144/igj.v2i3.59>
- Toan, D., & Duc Do, M. (2019). Riverbank Stability Assessment under River Water. *MDPI Water*, 11(2598), 29.