

Analisis Karakteristik dan Distribusi Sedimen Dasar (*Bed Load*) di Sungai Lesti Menuju Waduk Sengguruh

Anggara Wiyono Wit Saputra^{1*}, Dian Sisingsih², Emma Yuliani³, Prasetyo Rubiantoro⁴

Departemen Teknik Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang ^{1,2,3}

Laboratorium Tanah dan Air Tanah, Departemen Teknik Pengairan, Fakultas Teknik,

Universitas Brawijaya, Malang ⁴

E-mail: anggara.wws@ub.ac.id

Abstrak

Sedimentasi merupakan permasalahan utama dalam pengelolaan waduk karena dapat menurunkan kapasitas tampung dan mengganggu fungsi operasional. Salah satu sumber utama sedimen berasal dari aliran Sungai Lesti yang bermuara ke Waduk Sengguruh. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik sedimen dasar (bed load) berdasarkan distribusi ukuran butiran serta implikasinya terhadap proses sedimentasi di waduk. Metode penelitian meliputi survei lapangan, pengambilan sampel menggunakan Helley-Smith Bedload Sampler, serta analisis laboratorium dengan metode ayakan. Parameter yang dianalisis meliputi D_{10} , D_{30} , D_{60} , koefisien keseragaman (C_u), dan koefisien gradasi (C_c). Hasil penelitian menunjukkan bahwa sedimen didominasi oleh pasir halus hingga pasir sangat halus dengan tingkat keseragaman kurang terurut. Nilai C_u dan C_c menunjukkan adanya peningkatan variasi ukuran butiran serta distribusi yang semakin tidak merata pada lokasi yang mendekati waduk. Perbedaan karakteristik sedimen antara lokasi hulu dan hilir mencerminkan terjadinya seleksi hidrodinamik akibat penurunan kecepatan aliran. Partikel berukuran lebih kasar cenderung terendapkan di zona transisi sungai-waduk, sedangkan partikel halus tertransportasi lebih jauh dan terakumulasi di badan waduk. Kondisi tersebut mengindikasikan adanya proses sedimentasi yang lebih intens di dekat waduk, yang berpotensi mempercepat pendangkalan dan menurunkan kapasitas tampung dalam jangka panjang. Oleh karena itu, diperlukan pengelolaan sedimen secara terintegrasi dan berkelanjutan untuk menjaga keberlanjutan fungsi waduk.

Kata kunci: bed load, distribusi ukuran butiran, sedimentasi, sungai lesti, waduk sengguruh.

Abstract

Sedimentation is a major problem in reservoir management because it reduces storage capacity and affects operational performance. One of the main sediment sources comes from Sungai Lesti, which flows into Waduk Sengguruh. This study aims to analyze the characteristics of bed load sediment based on grain size distribution and its implications for sedimentation processes in the reservoir. The research methods included field surveys, sediment sampling using a Helley-Smith Bedload Sampler, and laboratory using sieve analysis methods. The analyzed parameters were D_{10} , D_{30} , D_{60} , uniformity coefficient (C_u), and gradation coefficient (C_c). The results indicate that the sediment is dominated by fine to very fine sand with poorly graded characteristics. The values of C_u and C_c show an increase in grain size variability and a more uneven distribution at locations closer to the reservoir. Differences in sediment characteristics between upstream and downstream areas reflect the occurrence of hydrodynamic sorting due to a decrease in flow velocity. Coarser particles tend to be deposited in the river-reservoir transition zone, while finer particles are transported farther and accumulate within the reservoir body.

These conditions indicate more intensive sedimentation processes near the reservoir, which may accelerate siltation and reduce storage capacity in the long term. Therefore, integrated and sustainable sediment management is required to maintain the long-term functionality of the reservoir.

Keywords: *bed load, grain size distribution, sedimentation, sungai lesti, waduk sengguruh.*

1. PENDAHULUAN

Sedimentasi merupakan salah satu permasalahan utama dalam pengelolaan waduk, termasuk di berbagai wilayah di Indonesia (Azdan & Samekto, 2008; Irma Suryanti & Wijayanti, 2024; Najimuddin et al., 2020). Proses sedimentasi akan dipengaruhi oleh musim (Syafa'at et al., 2025) dan juga terjadi sebagai akibat dari erosi lahan di Daerah Tangkapan Air (DTA) (Silvia et al., 2025), bangunan di sungai (Chakraborty & Ghosh, 2022), serta longsoran tebing waduk dan sungai (Hermawan, 2020). Sedimen yang masuk ke waduk sebagian akan mengendap di dasar perairan sehingga menyebabkan penurunan volume tampungan (Hilgert et al., 2024), sementara sebagian lainnya terbawa keluar bersama aliran air (*outflow*).

Pada tahap perencanaan, volume tampungan mati biasanya dirancang untuk menampung seluruh sedimen yang masuk ke dalam waduk. Namun, dalam pelaksanaannya, sedimen tidak hanya terakumulasi pada bagian tampungan mati. Endapan hasil erosi dapat tersebar di berbagai bagian waduk dengan pola tertentu yang dipengaruhi oleh bentuk waduk, sistem operasi, serta karakteristik sedimen (Morris & Fan, 1998). Laju sedimentasi dapat diperkirakan melalui analisis erosi lahan, sedimen layang (*suspended load*), dan sedimen dasar (*bed load*), dimana sebagian besar material sedimen tersebut berasal dari wilayah tangkapan air (Xu et al., 2024).

Salah satu waduk yang menghadapi permasalahan sedimentasi cukup serius adalah Bendungan Sengguruh. Bendungan ini terletak di bagian hulu Sungai Brantas, tepatnya di hilir pertemuan antara Sungai Brantas dan Sungai Lesti (Lailatul et al., 2024). dan berada di wilayah Kabupaten Malang. Setiap tahunnya, sekitar 528.915,9 m³ sedimen mengendap di waduk akibat proses erosi (Ishakputra et al., 2024). Akibatnya, kapasitas tampungan yang pada awal pembangunan tahun 1989 mencapai 21,5 juta m³ terus mengalami penurunan hingga hanya tersisa sekitar 1,12 juta m³ pada tahun 2023. Aliran sungai yang masuk ke waduk membawa sedimen dalam jumlah besar dan terus terakumulasi selama masa operasional.

Sedimen yang berasal dari Daerah Aliran Sungai (DAS) Lesti memiliki peran penting dalam pembentukan morfologi dasar Waduk Sengguruh. Akumulasi sedimen dalam jangka panjang menyebabkan perubahan bentuk dasar waduk yang dapat memengaruhi fungsi serta umur layanannya. Laju sedimentasi yang tinggi mengakibatkan pendangkalan, sehingga kapasitas tampungan dan efektivitas waduk sebagai sarana pengendali air tidak lagi sesuai dengan perencanaan awal.

Penelitian ini dilaksanakan pada Aliran Sungai Lesti yang terletak di Kabupaten Malang, Provinsi Jawa Timur. Wilayah Sub DAS Lesti memiliki ketinggian antara 235 hingga 3.676 meter di atas permukaan laut dengan luas mencapai 64.740,84 hektar, dan seluruh wilayahnya berada

dalam administrasi Kabupaten Malang (Pambudi et al., 2021). Sebagai bagian dari DAS Brantas, Sungai Lesti berperan penting dalam menerima curah hujan dan menyalurkan aliran air menuju Waduk Sengguruh.

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan kajian yang lebih mendalam untuk memahami karakteristik sedimen dasar (*bed load*) sebagai salah satu dasar dalam memprediksi laju sedimentasi di Waduk Sengguruh. Informasi ini diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan dalam upaya pengelolaan dan pemeliharaan waduk secara lebih optimal dan berkelanjutan.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi karakteristik sedimen di Sungai Lesti sebagai salah satu pemasok utama sedimen ke Waduk Sengguruh. Identifikasi dilakukan melalui survei lapangan, pengambilan sampel sedimen, serta pengujian di laboratorium.

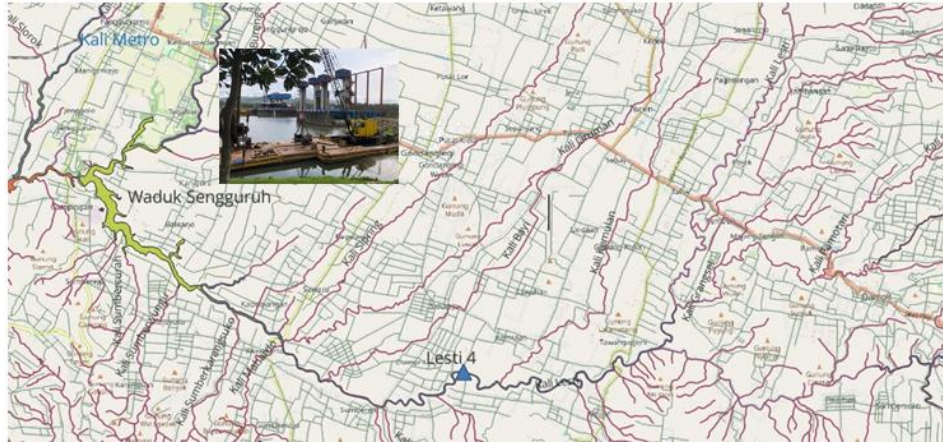
2. METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi Studi

Studi ini dilaksanakan pada DAS lesti di Kabupaten Malang, kurang lebih 25 km di bagian Selatan kota Malang Propinsi Jawa Timur. Ketinggian Sub DAS Lesti berkisar antara 235 - 3676 mdpl (di atas permukaan laut). DAS Lesti merupakan bagian dari DAS Brantas bagian hulu terletak di wilayah Kabupaten Malang, Propinsi Jawa Timur.

Kali Lesti merupakan anak sungai Kali Brantas, yang bermata air di lereng Gunung Semeru, mengalir sepanjang + 55 km. Pertemuan Kali Lesti dengan Kali Brantas di Waduk Sengguruh Desa Sengguruh. Secara geografis DAS Lesti berbentuk memanjang terletak diantara 112°42'58' - 112°56'21' BT dan 8°02'50' - 8°12'10' LS dengan luas area 64.740,84 ha dan secara administratif terletak di 12 wilayah kecamatan yaitu kecamatan Poncokusumo, Wajak, Ampelgading, Turen, Tirtoyudo, Dampit, Sumbermanjing Wetan, Gondanglegi, Bululawang, Gedangan, Pagak, dan Bantur.

Secara geografis, sungai Lesti merupakan inflow bagi waduk Sengguruh yang terletak diantara 07°44'20' - 08°17'45' LS dan 112°27'30' - 112°57'55' BT (Yuwono & Sabaruddin, 2014). Total volume tampungan waduk Sengguruh memiliki kapasitas sekitar 21,5 juta m³ (Ihsan et al., 2025), terdiri atas ±2,5 juta m³ volume efektif dan ±19 juta m³ tampungan volume sedimen (Yuwono & Sabaruddin, 2014). Bendungan Sengguruh mendapat pasokan air dari Sungai Brantas dan Sungai Lesti dengan debit rata-rata bulanan 55,2 m³/s. Skema Sungai Lesti dan Waduk Sengguruh disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema sungai Lesti dan bendungan Sengguruh

2.2 Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif untuk menggambarkan kondisi dan karakteristik sedimen di Sungai Lesti. Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui survei lapangan, observasi langsung, pengambilan sampel sedimen, serta pengujian laboratorium. Pengambilan sampel dilakukan di dua ruas Sungai Lesti dengan menggunakan Helley-Smith Bedload Sampler untuk mengukur sedimen dasar. Selain itu, pengukuran debit aliran Kecepatan aliran diukur menggunakan Current Meter dengan metode satu titik (0,6d) sesuai dengan kedalaman sungai di lokasi amatan, metode pelampung Digunakan sebagai pembanding dan cadangan apabila kondisi arus terlalu deras, dengan mengukur waktu tempuh benda apung pada lintasan sepanjang 10–20 meter., serta pengukuran penampang sungai menggunakan pita ukur. Sampel diambil pada setiap ruas dimana titik-titik ini ditempatkan pada bagian tepi kiri, tengah (as sungai), dan tepi kanan untuk menangkap variasi distribusi sedimen. dengan memperhatikan kedalaman dan kecepatan aliran guna memperoleh data yang akurat dan mewakili kondisi sungai.

2.3 Analisis Data

2.3.1 Pengambilan Sampel dengan Helley-Smith Bedload Sampler

Helley-Smith Bedload Sampler merupakan alat modifikasi dari BTMA sampler yang dikembangkan oleh Helley dan Smith (Helley & Smith, 1971). Alat ini terdiri atas nosel masuk, kantong sampel, dan rangka. Nosel sampler berbentuk persegi dengan ukuran $0,076 \times 0,076$ m, sedangkan kantong sampel terbuat dari bahan polyester dengan ukuran mesh 250 mikron. Keunggulan alat ini adalah kemudahan penggunaan dan tingkat akurasi yang tinggi berdasarkan hasil kalibrasi sebelumnya. Pengambilan sampel dilakukan dengan menurunkan alat Helley-Smith Bedload Sampler hingga menyentuh dasar sungai dan dibiarkan selama interval waktu 2–5 menit guna mengumpulkan material yang bergerak melintasi dasar sungai sehingga sedimen dasar masuk ke dalam kantong sampel. Gambar 2 menunjukkan alat Helley-Smith Bedload Sampler.



Gambar 2. Pengambilan sampling sedimen dengan alat Helley-Smith Bedload Sampler.

Setelah pengambilan sampel selesai, analisis terhadap sampel yang didapat dilakukan di laboratorium untuk menentukan karakteristik ukuran butiran dan distribusi partikel sedimen. Analisis ini melibatkan penggunaan metode seperti ayakan kering (*sieve analysis*) untuk mendapatkan distribusi ukuran butiran dari sampel. Hasil dari analisis ini akan digunakan untuk memahami karakteristik sedimen dan proses transportasi sedimen di lokasi tersebut.

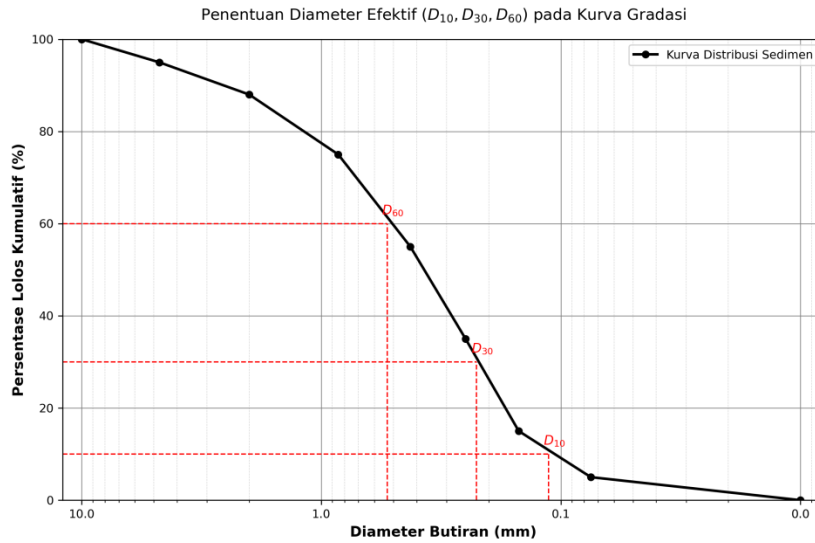
2.3.2 Analisis Ukuran Butiran (*Sieve Analysis*)

Setelah sampel sedimen dikumpulkan, analisis ukuran butiran dilakukan dengan menggunakan metode ayakan kering (*sieve analysis*) sesuai dengan standar yang berlaku, seperti ASTM D422 (*Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*). Sampel sedimen disaring melalui serangkaian ayakan yang memiliki ukuran bukaan mulai dari 8 mm hingga 0.063 mm. Setiap fraksi yang tertahan pada ayakan dihitung beratnya, kemudian dicatat sebagai distribusi ukuran butiran.

Persentase berat tanah yang tertahan merupakan perbandingan antara berat tanah yang tertahan pada saringan ke-*i* dan berat total tanah sampel yang diuji.

$$\% \text{ berat tertahan} = \frac{W_i}{W} \times 100\% \quad (1)$$

Dengan W_i = berat tertahan (gram) dan W = berat total tertahan (gram). Data persentase berat butiran yang lolos dari satu set saringan tersebut selanjutnya digambarkan dalam kurva distribusi ukuran partikel pada grafik semi-logaritma. Sumbu horizontal kurva merepresentasikan diameter butiran (D) dalam skala logaritma, sedangkan sumbu vertikal menunjukkan persentase lolos kumulatif sesuai SNI 03-1968-1990 (BSN, 1990). Dari grafik kurva distribusi, dilakukan identifikasi diameter efektif yang mencakup diameter butiran pada 10% fraksi lolos (D_{10}), diameter butiran pada 30% fraksi lolos (D_{30}), dan diameter butiran pada 60% fraksi lolos (D_{60}). Kurva distribusi butiran hasil dari analisa ayakan dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Kurva Distribusi Butiran

2.3.3 Analisis Hidrometer

Analisis hidrometer digunakan untuk menentukan distribusi ukuran partikel halus berdasarkan prinsip hukum Stokes. Metode ini mengukur kecepatan pengendapan partikel dalam media air. Sampel sedimen dicampur dengan air dalam tabung sedimentasi, kemudian pembacaan hidrometer dilakukan pada interval waktu tertentu. Data yang diperoleh digunakan untuk menentukan distribusi ukuran partikel halus (diameter <0,075 mm). Hasil analisis ini berfungsi untuk melengkapi data kurva gradasi dari hasil analisis ayakan, sehingga diperoleh gambaran distribusi ukuran butir yang komprehensif dari fraksi kasar hingga fraksi sangat halus.

Hukum Stokes ini menyatakan bahwa kecepatan pengendapan partikel dalam suatu fluida dipengaruhi oleh diameter partikel, gravitasi, viskositas fluida, serta perbedaan berat jenis antara partikel dan fluida. Kecepatan pengendapan partikel dalam media air ini dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$v = \frac{g (\rho_s - \rho_w) D^2}{18 \eta} \quad (2)$$

Dimana v adalah kecepatan pengendapan partikel (cm/s), g adalah percepatan gravitasi (cm/s^2), ρ_s adalah berat jenis butiran sedimen (g/cm^3), ρ_w adalah berat jenis air (g/cm^3), D adalah diameter partikel sedimen (cm), dan η adalah viskositas dinamis air ($\text{g/cm}\cdot\text{s}$ atau poise).

Kecepatan (v) juga didefinisikan sebagai jarak tempuh pengendapan (L) per satuan waktu (t). Oleh karena itu, diameter partikel dapat ditentukan melalui hubungan berikut:

$$D = \sqrt{\frac{18 \eta L}{g (\rho_s - \rho_w) t}} \quad (3)$$

Dimana L adalah jarak pengendapan yang merupakan kedalaman efektif yang terbaca pada hidrometer, yang berubah seiring dengan waktu pembacaan, dan t adalah interval waktu yang dibaca pada interval waktu tertentu (misalnya 2, 5, 15, 30, hingga 1440 menit).

2.3.4 Perhitungan Koefisien Uniformitas (C_u) dan Koefisien Kurva (C_c)

Nilai-nilai D_{10} , D_{30} , dan D_{60} yang didapatkan dari kurva distribusi butiran, selanjutnya

digunakan untuk perhitungan parameter Koefisien Keseragaman (C_u) dan Koefisien Kurvatur (C_c). Selanjutnya, hasil perhitungan C_u dan C_c dianalisis untuk menggambarkan karakteristik distribusi ukuran butiran dalam sampel sedimen serta untuk menentukan apakah sedimen tersebut termasuk dalam kategori seragam atau tidak. Nilai C_u dihitung menggunakan rumus berikut:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (4)$$

Dimana D_{60} adalah ukuran butiran pada persentil ke-60 (diameter butiran di mana 60% dari sampel lebih kecil), dan D_{10} adalah ukuran butiran pada persentil ke-10 (diameter butiran di mana 10% dari sampel lebih kecil).

Pengukuran D_{60} dan D_{10} diperoleh dengan merujuk pada kurva distribusi kumulatif dari ukuran butiran. D_{60} dan D_{10} dihitung dengan cara membaca nilai ukuran butiran pada titik persentil 60% dan 10% dari total massa sampel berdasarkan distribusi massa kumulatif.

Koefisien kurva (C_c) digunakan untuk menilai keseragaman distribusi ukuran butiran dalam sampel. C_c dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (5)$$

Dimana D_{30} adalah ukuran butiran pada persentil ke-30. D_{30} dihitung dengan cara serupa dengan D_{60} dan D_{10} , yaitu dengan mengacu pada distribusi ukuran butiran yang didapatkan dari ayakan. Nilai C_c memberikan informasi tentang sejauh mana distribusi ukuran butiran mendekati distribusi yang ideal, di mana $C_c = 1$ menunjukkan distribusi ukuran butiran yang lebih seragam.

Hasil perhitungan C_u dan C_c digunakan untuk menganalisis tingkat keseragaman dan keberagaman ukuran butiran sedimen di masing-masing lokasi. Hasil perhitungan ini kemudian digolongkan menjadi dua kriteria yaitu Gradasi Baik (*well-graded*), Jika $C_u > 6$ (untuk pasir) atau $C_u > 4$ (untuk kerikil) dan nilai C_c berada di antara 1 dan 3, sedangkan jika nilai C_u sangat rendah (mendekati 1) maka sampel dikategorikan mempunyai Gradasi Seragam (*uniformly-graded*) yang menunjukkan bahwa sebagian besar partikel memiliki ukuran yang hampir sama. Berdasarkan nilai C_u dan C_c yang diperoleh, dapat disimpulkan apakah sedimen tersebut bersifat seragam, sangat seragam, atau kasar, dan bagaimana hal tersebut mempengaruhi transportasi sedimen dan sedimentasi di dekat waduk.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sungai Lesti yang mengalir ke Waduk Sengguruh merupakan salah satu sungai yang memiliki peran penting dalam ekosistem dan penyediaan sumber daya air di waduk tersebut. Salah satu parameter penting yang perlu dipantau dalam pengelolaan sungai adalah kandungan sedimen, terutama bed load, yang dapat mempengaruhi kualitas air dan kapasitas waduk. Dalam penelitian jenis dan karakteristik sedimen bed load di Sungai Lesti diidentifikasi menggunakan metode observasi lapangan serta pengambilan sampel menggunakan alat Halley Smith Sampler. Pengambilan sampel sedimen dilakukan pada dua titik di sepanjang sungai Lesti. Lokasi pengambilan sampel ditentukan pada bagian hulu dan hilir sungai untuk merepresentasikan karakteristik sedimen sebelum memasuki waduk sebagaimana terlihat pada Gambar 4.



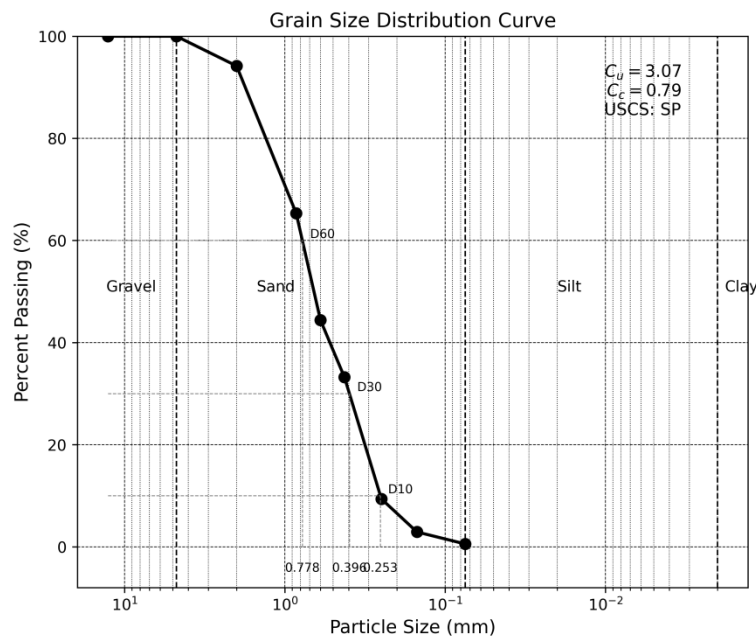
Titik lokasi pengukuran sedimen

Lokasi 1 (terletak di hulu Lokasi 2)

Lokasi 2 (mendekati waduk Sengguruh)

Gambar 4. Lokasi sampling sedimen

Berdasarkan observasi lapangan, Sungai Lesti memiliki kedalaman yang bervariasi antara 1 hingga 3 meter, dengan lebar sekitar 25-50 meter di lokasi pengambilan sampel. Aliran air tergolong sedang hingga cepat, terutama pada musim hujan. Di dasar sungai terdapat variasi jenis sedimen, mulai dari pasir halus hingga batu besar. Kondisi dasar sungai lebih dominan terdiri dari batu-batu besar dan kerikil di beberapa bagian, dengan adanya lapisan pasir di bagian lainnya. Analisis distribusi ukuran butiran sedimen bed load dilakukan menggunakan data dari pengambilan sampel yang dilakukan di dua lokasi, masing-masing di lokasi yang 1 yang terletak di bagian hulu dari lokasi 2. Lokasi 2 ini terletak pada bagian sungai mendekati waduk Sengguruh. Gradasi butiran hasil sampling sedimen pada Lokasi 1 dapat dilihat pada gambar 5, sedangkan pada Lokasi 2 ditampilkan pada Gambar 6.



Gambar 5. Kurva distribusi sedimen pada lokasi 1

Berdasarkan kurva distribusi butiran yang diperoleh pada Lokasi 1, terdapat karakteristik sedimen yang dominan dalam sampel ini, yang mencerminkan bahwa sebagian besar sedimen di

lokasi ini termasuk dalam kategori pasir kasar dan sedang menurut skala Wentworth. Ukuran butiran sedimen D_{60} pada ukuran 0.778 mm menunjukkan bahwa sebagian besar sedimen berukuran pasir halus hingga kasar, dengan koefisien uniformitas (C_u) sebesar 3.07 yang menunjukkan distribusi ukuran butiran yang relatif moderat, namun masih bervariasi. Sedimen dengan koefisien kekasaran (C_c) 0.79 menunjukkan bahwa sedimen tersebut lebih cenderung seragam dalam hal ukuran dibandingkan dengan sedimen yang lebih beragam.

Berdasarkan grafik distribusi butiran dan dengan mempertimbangkan ukuran sedimen terbesar D_{60} dan D_{30} yang lebih kecil, dapat disimpulkan bahwa sedimentasi yang terjadi di waduk kemungkinan besar terdiri dari pasir kasar hingga halus, dengan ukuran butiran yang lebih kecil, seperti yang tercermin dari D_{10} pada ukuran 0.253 mm. Dalam proses sedimentasi di waduk, partikel-partikel halus dan sedang akan terendapkan lebih cepat karena kecepatan aliran yang lebih lambat. Fenomena ini menunjukkan bahwa lumpur dan pasir halus akan lebih banyak terkumpul di bagian mendekati waduk, yang mempengaruhi kapasitas penampungan waduk dalam jangka panjang. Hal ini perlu diperhatikan untuk manajemen waduk guna mengurangi masalah pendangkalan.

Kurva distribusi butiran pada sampel menunjukkan bahwa sedimen yang ditemukan di lokasi tersebut didominasi oleh butiran pasir kasar dan sedang. Berdasarkan skala Wentworth, sebagian besar butiran memiliki ukuran di antara 4.75 mm hingga 0.075 mm, yang termasuk dalam kategori pasir kasar dan pasir halus (Wentworth, 1922). Pengukuran D_{60} sebesar 0.778 mm menunjukkan bahwa sekitar 60% dari sedimen yang diperoleh berukuran lebih besar dari 0.778 mm, yang merupakan karakteristik umum untuk sedimen di daerah dekat waduk yang mengalami transportasi sungai dengan aliran yang cukup kuat. Sebagai tambahan, koefisien keseragaman (C_u) yang tercatat sebesar 3.07 menunjukkan bahwa distribusi ukuran butiran sedimen cukup bervariasi, meskipun tidak terlalu ekstrem, yang dapat mempengaruhi pola sedimentasi di waduk (Wang et al., 2022). Tabel 1 menunjukkan klasifikasi butiran pada Lokasi 1 berdasarkan skala Wentworth.

Tabel 1. Klasifikasi butiran Berdasarkan Wentworth Scale di bagian hulu (Lokasi 1)

| Diameter (mm) | Jenis Butiran | Persentase (%) |
|---------------|--------------------|----------------|
| 50.8 | Kerikil besar | 0.00% |
| 38.1 | Kerikil sedang | 0.00% |
| 25.4 | Kerikil kecil | 0.00% |
| 19 | Kerikil kecil | 0.00% |
| 12.7 | Pasir kasar besar | 0.00% |
| 9.5 | Pasir kasar | 0.94% |
| 4.75 | Pasir sedang besar | 26.07% |
| 2 | Pasir kasar | 26.68% |
| 0.85 | Pasir halus | 40.23% |
| 0.6 | Pasir kasar | 20.57% |
| 0.425 | Pasir sedang | 49.29% |
| 0.25 | Pasir halus | 50.17% |
| 0.15 | Pasir halus | 20.57% |
| 0.075 | Pasir sangat halus | 8.94% |
| Pan | Lumpur | 3.39% |

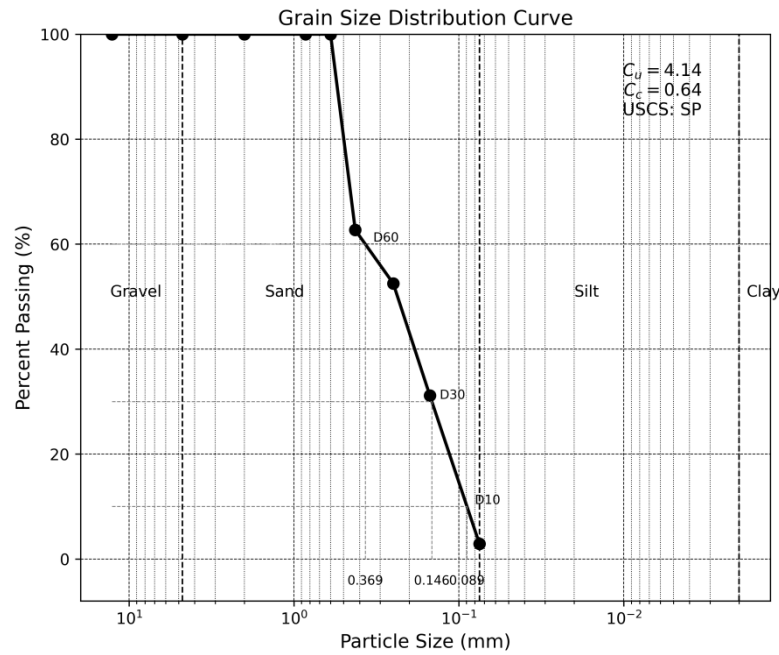
Fenomena transportasi sedimen di sungai khususnya pada Lokasi 1 dapat dilihat dari bentuk kurva distribusi butiran pada Gambar 3. Dengan semakin kecilnya ukuran butiran yang lolos dari ukuran saringan, hal ini mengindikasikan adanya proses transportasi sedimen melalui proses erosi dan pengendapan yang dipengaruhi oleh kecepatan aliran sungai. Berdasarkan data ini, sebagian besar partikel pasir berukuran halus hingga sedang mendominasi di sepanjang sungai, menunjukkan adanya transportasi dominan dari pasir kasar dan sedang yang bisa terbawa dalam kondisi aliran yang lebih kuat. Fenomena ini mengarah pada kemungkinan terjadinya sedimentasi di waduk, di mana aliran sungai berkurang kecepatannya, menyebabkan butiran yang lebih besar mengendap terlebih dahulu.

Proses transportasi sedimen dalam aliran sungai yang terjadi pada lokasi ini sangat dipengaruhi oleh ukuran butiran dan kecepatan aliran air. Berdasarkan hasil pengukuran menggunakan current meter, Lokasi 1 memiliki kecepatan aliran rerata 0.274 m/detik. Berdasarkan distribusi butiran, dapat terlihat bahwa mayoritas sedimen yang lebih besar (pasir kasar) akan terangkut lebih cepat dalam aliran sungai yang kuat. Fenomena ini selaras dengan teori transportasi sedimen yang menyatakan bahwa semakin besar ukuran partikel, semakin besar pula kemampuan partikel tersebut untuk bergerak dalam aliran air (Einstein, 1951). Sebaliknya, partikel yang lebih kecil, seperti pasir halus dan silt, lebih rentan untuk tertahan dalam aliran air yang lebih lambat dan akan lebih sering terendapkan ketika aliran berkurang kecepatannya, seperti yang terjadi di area waduk.

Kurva distribusi ukuran butiran sedimen pada sampel di Lokasi 2 sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4, menunjukkan bahwa sedimen didominasi oleh fraksi pasir, khususnya pasir sedang hingga pasir halus, dengan persentase lolos tinggi pada ukuran di bawah 1 mm. Fraksi kerikil hampir tidak ditemukan, sehingga sedimen tergolong berbutir relatif halus. Berdasarkan nilai koefisien keseragaman ($C_u = 4,14$) dan koefisien gradasi ($C_c = 0,64$), sedimen termasuk kategori buruk terurut (*poorly graded*), yang menandakan distribusi ukuran butiran tidak merata (Das, 2005).

Dominasi fraksi pasir menunjukkan bahwa sedimen umumnya terangkut sebagai muatan dasar dan muatan melayang. Partikel pasir umumnya tertransportasikan melalui mekanisme saltasi dan rolling pada dasar sungai, sedangkan partikel halus dapat tersuspensi dalam kolom air (Julien, 2010). Mendekati area waduk, kecepatan aliran sungai menurun akibat efek pembendungan, sehingga kemampuan transportasi sedimen berkurang dan memicu deposisi material kasar di zona transisi sungai-waduk (Morris & Fan, 1998)

Partikel yang lebih halus akan mengendap lebih jauh di dalam badan waduk pada kondisi perairan yang lebih tenang. Proses ini menyebabkan akumulasi sedimen secara bertahap di bagian mendekati waduk, yang dalam jangka panjang berpotensi menurunkan kapasitas tampung waduk dan mengganggu fungsi operasionalnya (Tu et al., 2026).



Gambar 6. Distribusi butiran di Hilir (Lokasi 2)

Berdasarkan kurva distribusi butiran di lokasi 2 yang disajikan dalam Gambar 5, sampel sedimen menunjukkan bahwa nilai D_{10} adalah 0,089 mm, yang berarti bahwa 10% dari sedimen terdiri dari partikel yang lebih kecil dari ukuran ini. Dalam konteks sedimentasi dekat waduk, deposisi partikel-partikel halus ini terjadi ketika kecepatan aliran sungai menurun drastis dekat dengan zona penampungan waduk. Nilai D_{60} (0,369 mm) menunjukkan bahwa 60% dari partikel sedimen lebih kecil dari diameter ini. Sedimentasi di wilayah ini dikendalikan oleh penurunan kecepatan air, yang memungkinkan partikel kasar untuk mengendap dari aliran, sementara partikel yang lebih halus dapat tetap tersuspensi dan perlahan-lahan terakumulasi di dasar sungai (Lahopang et al., 2023; Parsons et al., 2018). Jenis sedimentasi ini khas untuk sungai yang berada dekat dengan waduk atau dam, dimana kecepatan pengendapan partikel yang lebih besar melebihi partikel yang lebih halus.

Tabel 2. Klasifikasi butiran Berdasarkan Wentworth Scale di bagian mendekati waduk Selorejo (Lokasi 2)

| Diameter (mm) | Jenis Butiran | Persentase (%) |
|---------------|-------------------------|----------------|
| 50.8 | Kerikil besar | 0.00% |
| 38.1 | Kerikil sedang | 0.00% |
| 25.4 | Kerikil kecil | 0.00% |
| 19 | Kerikil kecil | 0.00% |
| 12.7 | Kerikil kecil | 0.00% |
| 9.5 | Kerikil semacam kerikil | 0.00% |
| 4.75 | Pasir kasar besar | 0.00% |
| 2 | Pasir kasar | 0.00% |
| 0.85 | Pasir halus | 0.00% |

| Diameter (mm) | Jenis Butiran | Persentase (%) |
|------------------|--------------------|-------------------|
| 0.6 | Pasir kasar | 0.50% |
| 0.425 | Pasir sedang | 36.70% |
| 0.25 | Pasir halus | 12.40% |
| 0.15 | Pasir halus | 20.20% |
| 0.075 | Pasir sangat halus | 25.30% |
| Pan | Lumpur | 4.90% |

Berdasarkan kurva distribusi ukuran butiran pada Gambar 5, sampling sedimen pada lokasi 2 dianalisis menggunakan Wentworth Scale, yang mengklasifikasikan sedimen berdasarkan ukuran partikel menjadi beberapa kategori: batuan besar (gravel), pasir, lanau, dan lempung. Sedimen di lokasi ini, berdasarkan Wentworth Scale terbagi ke dalam beberapa kategori ukuran partikel. Dari grafik yang disajikan, terlihat bahwa sebagian besar butiran berada pada rentang ukuran pasir, khususnya pasir sedang hingga pasir sangat halus, dengan nilai D_{60} 0,369 mm, D_{30} 0,146 mm, dan D_{10} 0,089 mm. Hal ini menunjukkan bahwa sedimen di lokasi penelitian didominasi oleh fraksi pasir, sementara fraksi lanau dan lempung relatif sedikit. Dengan demikian, berdasarkan klasifikasi Wentworth Scale, sedimen di lokasi ini termasuk dalam kategori sedimen berpasir (*sand-dominated sediment*), yang umumnya memiliki karakteristik permeabilitas cukup baik dan kemampuan pengendapan yang relatif cepat dibandingkan sedimen berbutir halus. Kondisi ini menunjukkan bahwa sedimen memiliki ukuran butiran relatif kecil hingga menengah, sehingga cukup mudah tertransportasikan oleh aliran sungai.

Berdasarkan perhitungan, nilai C_u (koefisien keseragaman) adalah 4.14 dan C_c (koefisien gradasi) adalah 0.64. Nilai $C_u > 4$ menunjukkan bahwa sedimen di lokasi ini tergolong dalam kategori sedimen buruk terurut (*poorly sorted*), yang berarti ada perbedaan ukuran partikel yang cukup besar di dalam sampel. Semakin tinggi nilai C_u , semakin beragam ukuran partikel dalam sedimen, yang mencerminkan fluktuasi dalam kecepatan dan energi aliran sungai yang mengangkut sedimen tersebut (Fry et al., 2019). $C_c < 1$ menunjukkan bahwa sedimen ini memiliki distribusi ukuran yang tidak merata, yang mengindikasikan bahwa material yang terdeposit di dekat waduk akan cenderung lebih terfragmentasi.

Pada bagian sungai yang telah mendekati waduk, kecepatan aliran cenderung menurun akibat adanya pengaruh muka air waduk (*backwater effect*). Penurunan kecepatan aliran ini menyebabkan berkurangnya energi kinetik aliran, sehingga kemampuan sungai dalam mengangkut sedimen juga menurun. Akibatnya, sedimen berukuran lebih besar seperti pasir sedang dan pasir kasar akan mulai mengalami pengendapan terlebih dahulu melalui mekanisme *bed load* (muatan dasar), yaitu bergerak dengan cara menggelinding, melompat (*saltation*), atau menggeser di dasar sungai.

Sementara itu, sedimen yang lebih halus seperti pasir halus dan lanau masih dapat terbawa dalam bentuk *suspended load* (muatan melayang) pada jarak tertentu, namun pada akhirnya juga akan mengendap ketika kecepatan aliran semakin rendah di dalam badan waduk. Fraksi yang sangat halus dapat terbawa lebih jauh hingga ke bagian tengah atau hilir waduk sebelum mengalami sedimentasi.

Berdasarkan kurva distribusi ukuran butiran sedimen pada Gambar 4 dan Gambar 5, terdapat perbedaan karakteristik yang jelas antara lokasi hulu (Lokasi 1) dan lokasi yang

mendekati waduk (Lokasi 2). Di Lokasi 1, sedimen didominasi oleh pasir kasar hingga pasir halus dengan diameter 0,15 mm hingga 4,75 mm, yang menunjukkan bahwa energi aliran masih cukup tinggi untuk mengangkut material berukuran relatif besar. Kondisi ini didukung oleh nilai koefisien keseragaman (C_u) sebesar 3,07, yang menunjukkan distribusi ukuran butiran relatif lebih seragam, serta nilai koefisien gradasi (C_c) sebesar 0,79 yang mendekati kondisi gradasi normal. Menurut Julien (2010), sedimen dengan karakteristik seperti ini umumnya terangkut sebagai muatan dasar melalui mekanisme rolling dan saltasi.

Sebaliknya, di Lokasi 2 yang berada lebih dekat dengan waduk, distribusi sedimen didominasi oleh pasir halus dengan diameter 0,075 mm hingga 0,425 mm akibat menurunnya kecepatan aliran. Kecepatan Aliran di Lokasi 2 tercatat rata-rata sebesar 0,115 m/s. Kecepatan ini menunjukkan penurunan sekitar 58% dibandingkan dengan kecepatan di Lokasi 1 yang mencapai 0,274 m/s. Penurunan kecepatan ini mengurangi kapasitas angkut sedimen sehingga memicu pengendapan fraksi sedimen yang lebih besar di dasar sungai ketika aliran sungai mendekati waduk. Nilai C_u sebesar 4,14 menunjukkan variasi ukuran butiran yang lebih besar dibandingkan Lokasi 1, sedangkan nilai C_c sebesar 0,64 mengindikasikan distribusi ukuran yang semakin tidak merata. Nilai C_u yang meningkat dan C_c yang rendah menunjukkan kondisi tanah atau sedimen yang buruk terurut (*poorly graded*), yang mencerminkan proses deposisi yang tidak selektif (Das & Sobhan, 2016).

Perbedaan nilai C_u dan C_c antara kedua lokasi tersebut mencerminkan perubahan kondisi hidrodinamik sepanjang alur sungai (Maini et al., 2025). Di bagian hulu, sedimen masih mengalami proses transportasi yang aktif dan selektif, sehingga hanya partikel tertentu yang dominan terangkut. Sementara itu, di bagian yang mendekati waduk, meningkatnya C_u dan menurunnya C_c menunjukkan terjadinya akumulasi berbagai ukuran partikel akibat berkurangnya energi aliran. Menurut Morris dan Fan (1998), kondisi ini umum terjadi pada zona transisi sungai-waduk, di mana kecepatan aliran menurun dan kapasitas angkut sedimen berkurang secara signifikan.

Akibat penurunan energi aliran tersebut, partikel berukuran besar akan terendapkan lebih awal, sedangkan partikel yang lebih halus tetap terbawa hingga memasuki badan waduk. Dominasi pasir halus di Lokasi 2, yang disertai nilai C_u lebih tinggi dan C_c lebih rendah, menunjukkan bahwa sebagian besar sedimen yang masuk ke waduk mudah terakumulasi, yang mengindikasikan adanya proses sedimentasi yang lebih intens di dekat waduk.

Dengan demikian, kombinasi dominasi pasir halus, peningkatan nilai C_u , dan penurunan nilai C_c di Lokasi 2 menunjukkan bahwa kapasitas transportasi sedimen telah menurun secara signifikan. Kondisi ini berpotensi mempercepat pendangkalan waduk dan menurunkan kapasitas tampungnya dalam jangka panjang apabila tidak dilakukan pengelolaan sedimen yang berkelanjutan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis distribusi ukuran butiran, nilai C_u , dan C_c , terdapat perbedaan karakteristik sedimen antara lokasi hulu dan lokasi yang mendekati waduk Sengguruh. Di Lokasi 1, sedimen relatif lebih seragam dengan dominasi pasir kasar hingga halus, menunjukkan kondisi transportasi yang masih aktif. Sementara itu, di Lokasi 2, sedimen didominasi pasir halus dengan variasi ukuran yang lebih besar, menandakan penurunan energi aliran. Perubahan karakteristik ini menunjukkan terjadinya pengendapan bertahap dari material kasar hingga halus menuju waduk, yang mengindikasikan adanya proses sedimentasi yang lebih intens di dekat waduk. Kondisi tersebut berpotensi menyebabkan pendangkalan dan penurunan kapasitas tampung waduk dalam jangka panjang, sehingga diperlukan pengelolaan sedimen yang berkelanjutan.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk menganalisis laju transportasi sedimen secara kuantitatif dengan melibatkan data debit aliran, kecepatan arus, dan beban sedimen tersuspensi maupun dasar. Selain itu, kajian mengenai pengaruh perubahan tata guna lahan di daerah tangkapan air terhadap produksi sedimen juga perlu dilakukan. Penggunaan model hidrodinamika dan sedimentasi berbasis numerik diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih akurat mengenai pola pengendapan dan prediksi pendangkalan waduk di masa mendatang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tim penulis mengucapkan terimakasih kepada Badan Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (BPPM) Fakultas Teknik Universitas Brawijaya untuk dana hibah Penelitian DIPA FT UB dengan no. 22/UN10.F07/PN/2024 yang telah diberikan untuk terlaksananya kegiatan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Azdan, M. D., & Samekto, C. R. (2008). Kritisnya Kondisi Bendungan di Indonesia. *Seminar Nasional Bendungan Besar Indonesia*.
- BSN. (1990). *SNI 03-1968-1990 metode pengujian analisis saringan agregat halus dan kasar*. BSN.
- BSN. (2012). *SNI ASTM C136 2012 Metode Uji Untuk Analisis Saringan Agregat Halus Dan Agregat Kasar*.
- Chakraborty, T., & Ghosh, K. (2022). Impact of human intervention structures on the rivers: An investigation of the spatiotemporal variation of grain size in the Tista River, eastern Himalayas. *Earth Surface Processes and Landforms*, 47(9), 2245–2265. <https://doi.org/10.1002/esp.5374>
- Das, B. M. (2005). *Fundamentals of Geotechnical Engineering*. Thomson.
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2016). *Principles of Geotechnical Engineering*. Cengage Learning.
- Einstein, H. A. (1951). Bed-Load Function For Sediment Transportation In Open Channel Flows. *Water Resources Building*, 43.
- Helley, E., & Smith, W. (1971). Development and calibration of a pressure-difference bedload sampler. In *Open-File Report*. <https://doi.org/10.3133/ofr73108>
- Hermawan, C. (2020). Analisis Perhitungan Transport Sediment Pada Hulu Waduk Wonogiri. *JURNAL PLANOLOGI DAN SIPIL (JPS)*, 2(1), 84–114.

- Hilgert, S., Sotiri, K., & Fuchs, S. (2024). Review of methods of sediment detection in reservoirs. *International Journal of Sediment Research*, 39(1), 28–43. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2023.12.004>
- Ihsan, B., Asmaranto, R., & Saputra, A. W. W. (2025). Studi Perencanaan Tanggul Spoilbank dengan Material Sedimen Disposal di Waduk Sengguruh. *Jurnal Teknologi Dan Rekayasa Sumber Daya Air*, 5(2), 1178–1188. <https://doi.org/10.21776/ub.jtresda.2025.005.02.112>
- Irma Suryanti, & Wijayanti, P. R. (2024). Peran Serta Masyarakat Pemeliharaan Bendungan terhadap Sedimentasi di Bendungan Benel dan Palasari Kabupaten Jembrana. *International Journal of Community Service Learning*, 7(4 SE-Articles), 407–414. <https://doi.org/10.23887/ijcsl.v7i4.64573>
- Ishakputra, J. A., Lestari, S., Yuniarti, T., Al Akbar, B. F., Herlambang, I. F., Asyraf, M. R., & Rachman, M. A. (2024). Rekayasa Hidraulik untuk Pengendalian Sedimentasi pada Bendungan Sengguruh. *Jurnal Teknik Sumber Daya Air*, 4(2 SE-Articles), 219–230. <https://doi.org/10.56860/jtsda.v4i2.108>
- Julien, P. Y. (2010). *Erosion and Sedimentation* (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511806049>
- Lahopang, V. R. A., Widada, S., & Atmodjo, W. (2023). Sebaran Ukuran Butir Sedimen di Muara Sungai Sragi Baru-Wonokerto, Kabupaten Pekalongan, Jawa Tengah. *Indonesian Journal of Oceanography*, 5(1), 18–27. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v5i1.15628>
- Lailatul, N., Sudartik, S., & Yushardi, Y. (2024). Analisis Potensi Air di Waduk Sengguruh dan Waduk Wonorejo sebagai PLTA di Daerah DAS Brantas. *J-Eltrik*, 6(1), 41–49. <https://doi.org/10.30649/je.v6i1.135>
- Maini, M., Kiranaratri, A. H., Susanti, J. E., & Saputra, C. A. (2025). Identifikasi Karakteristik Distribusi Ukuran Butir Dan Ketidakteraturan Sedimen Pada Sungai Way Lunik. *Jurnal Kajian Teknik Sipil*, 10(1), 9–17. <https://doi.org/10.52447/jkts.v10i1.8133>
- Morris, G., & Fan, J. (1998). *Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs and watersheds for sustainable use*. McGraw-Hill Book Co.
- Najimuddin, D., Israjunna, I., & Purnama, A. (2020). Penanggulangan Sedimentasi Pada Bendungan Plara Kabupaten Sumbawa . *Indonesian Journal of Applied Science and Technology*, 1(2 SE-Articles), 64–70. <https://journal.publication-center.com/index.php/ijast/article/view/71>
- Pambudi, A. S., Moersidik, S. S., & Karuniasa, M. (2021). Analisis Sebaran Limpasan Permukaan pada Sub DAS Lesti Sebagai Pertimbangan Konservasi Hulu DAS Brantas. *Jurnal Teknik Pengairan: Journal of Water Resources Engineering*, 12(2), 104–115. <https://doi.org/10.21776/ub.pengairan.2021.012.02.03>
- Parsons, A. J., Cooper, J., Wainwright, J., & Sekiguchi, T. (2018). Virtual velocity of sand transport in water. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(3), 755–761. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/esp.4262>
- Silvia, N., Setiawan, A. R., & Wiwoho, B. S. (2025). Pendugaan Kerentanan Erosi Dan Sedimentasi DAS Mentaya Menggunakan Persamaan RUSLE. *JTSL (Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Lahan)*, 12(2 SE-Articles), 255–266. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2025.012.2.4>
- Syafa'at, H. M., Prasetyo, Y. W., Sujatmiko, H., Purnomo, D. A., & Erwanto, Z. (2025). Analisis Laju Sedimen Berdasarkan Data Unsteady Flow Real Time Dengan HEC-RAS di DAS Bomo Banyuwangi. *Journal of Applied Civil Engineering and Infrastructure Technology*, 6(1), 69–80. <https://doi.org/10.52158/jaceit.v6i1.1114>
- Tu, D., Wang, H., Bi, N., Wu, X., Wang, A., Qi, F., Dou, Y., & Ren, Y. (2026). Advancing river management under dam regulation: Insights from the Yellow River. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 64, 103134. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2026.103134>

- Wang, Y., Li, B., Liu, J., Feng, Q., Liu, W., Wang, X., & He, Y. (2022). Effects of cascade reservoir systems on the longitudinal distribution of sediment characteristics: a case study of the Heihe River Basin. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(2), 2911–2923. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15760-y>
- Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*, 30(5), 377–392.
- Xu, J., Zhao, Y., Chen, Y., Du, P., & Qu, L. (2024). Hydrological Changes and Sediment Dynamics in the Inner Mongolia Section of the Yellow River: Implications for Reservoir Management. In *Water* (Vol. 16, Issue 6, p. 810). <https://doi.org/10.3390/w16060810>
- Yuwono, E., & Sabaruddin, M. (2014). Kajian Pengerukan Waduk Sengguruh Kepanjen Kabupaten Malang. *JTT (Jurnal Teknologi Terpadu)*, 2(1).