

ANALISIS KARATERISTIK BUTIRAN SEDIMEN DI BENDUNG TALAWAAN

Brian Rivaldo Purba¹, Yanty Christine Grace Memah²,

Lady Fandi Alifiah Tandako³, Tiny Mananoma⁴

^{1,2,3,4} Program Pascasarjana, Universitas Sam Ratulangi

e-mail: ¹brianrivaldo@gmail.com, ²yantychgm@gmail.com, ³ladytan1209@gmail.com,
⁴tmananoma@yahoo.com

ABSTRAK

Bendung Talawaan di Sungai Talawaan, Kabupaten Minahasa Utara, mengalami permasalahan sedimentasi yang menurunkan kapasitas tampung kolam olak dan mengganggu fungsi intake. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik butiran sedimen dasar (bed load) di area bendung serta mengidentifikasi indikasi sumber sedimen yang berkontribusi terhadap penumpukan. Pengambilan sampel dilakukan dengan metode purposive sampling pada sembilan titik yang tersebar secara longitudinal (hulu, tengah, hilir) dan lateral (kiri, tengah, kanan). Analisis ukuran butir menggunakan metode analisis saringan (sieve analysis) sesuai SNI 3423:2008, dilanjutkan perhitungan diameter karakteristik (D10–D90), koefisien gradasi (Cu dan Cc), serta parameter statistik Folk dan Ward (1957). Hasil menunjukkan terjadinya fenomena downstream fining, yaitu pengecilan ukuran butir searah aliran dari pasir sangat kasar–kerikil halus di hulu (D50 = 2,07–2,37 mm) menjadi pasir sedang–halus di hilir (D50 = 0,33–0,79 mm), yang dipicu efek air balik (backwater effect) bendung. Sedimen di depan intake (Hilir Kiri) tergolong gradasi buruk terputus (gap-graded, Cc = 0,91), sedangkan sisi dalam belokan (Hilir Kanan) menjadi zona mati dengan akumulasi pasir halus tersortir baik (leptokurtic). Indeks pemilahan buruk di segmen tengah ($\sigma I = 1,17–1,37$) mengindikasikan pasokan sedimen antropogenik dari penambangan pasir (Galian C), Pertambangan Emas Tanpa Izin (PETI), dan alih fungsi lahan. Disimpulkan bahwa sedimentasi bendung dipasok secara simultan oleh sumber alami lereng Gunung Klabat dan sumber antropogenik, sehingga diperlukan pembilasan hidraulis berkala, pengerukan, dan pengendalian aktivitas DAS.

Kata Kunci: Analisis Saringan, Bendung Talawaan, Downstream Fining, Karakteristik Butiran Sedimen.

ABSTRACT

Talawaan Weir on the Talawaan River, North Minahasa Regency, suffers from sedimentation problems that reduce the stilling-basin storage capacity and disrupt the intake function. This study aims to analyse the grain characteristics of bed-load sediment around the weir and to identify the indicative sources contributing to the deposition. Samples were collected using purposive sampling at nine points distributed longitudinally (upstream, middle, downstream) and laterally (left, centre, right). Grain-size analysis followed the sieve analysis method according to SNI 3423:2008, followed by computation

of characteristic diameters (D_{10} – D_{90}), gradation coefficients (C_u and C_c), and the statistical parameters of Folk and Ward (1957). The results reveal a downstream-fining phenomenon, in which the grain size decreases along the flow from very coarse sand–fine gravel upstream ($D_{50} = 2.07$ – 2.37 mm) to medium–fine sand downstream ($D_{50} = 0.33$ – 0.79 mm), driven by the weir's backwater effect. Sediment in front of the intake (Downstream-Left) is gap-graded ($C_c = 0.91$), whereas the inner bend (Downstream-Right) acts as a dead-water zone accumulating well-sorted fine sand (leptokurtic). Poor sorting in the middle segment ($\sigma I = 1.17$ – 1.37) indicates an anthropogenic sediment supply from sand mining (Galian C), unlicensed gold mining (PETI), and land-use change. It is concluded that the weir sedimentation is supplied simultaneously by natural sources from the slopes of Mount Klabat and by anthropogenic sources, so that periodic hydraulic flushing, dredging, and watershed-activity control are required.

Keywords: *Downstream Fining, Sediment Grain Characteristics, Sieve Analysis, Talawaan Weir.*

PENDAHULUAN

Sungai merupakan sistem alam yang dinamis berperan sebagai media transportasi air dan sedimen dari hulu menuju hilir (Soulsby, 1995). Dalam prosesnya, sedimen mengalami pengangkutan, pengendapan, dan redistribusi yang dipengaruhi oleh kondisi hidraulik serta morfologi sungai (Soewarno, 1991). Proses sedimentasi yang terjadi secara alami dapat menjadi permasalahan serius, khususnya pada bangunan air seperti bendung (Morris & Fan, 1998).

Bendung berfungsi utama dalam pengaturan aliran dan penyediaan air irigasi, namun keberadaannya menyebabkan perubahan kecepatan aliran yang signifikan sehingga memicu pengendapan sedimen di sekitar bangunan. Pengurangan aliran akibat adanya pembendungan menyebabkan perubahan pada saluran dan alirannya yang berujung pada akumulasi sedimen (Azmeri dkk, 2020). Kondisi ini dapat menyebabkan pendangkalan, penurunan kapasitas tampung, serta degradasi kinerja operasional bendung secara keseluruhan (Hairan dkk, 2023).

Bendung Talawaan yang terletak di Sungai Talawaan, Kabupaten Minahasa Utara, Sulawesi Utara mengalami permasalahan sedimentasi yang cukup signifikan. Keadaan sedimentasi di Bendung Talawaan saat ini telah mencapai tahap yang mengkhawatirkan, ditandai dengan penurunan kapasitas tampung kolam olah secara drastis serta banyaknya sedimen yang menyumbat pintu pengambilan. Permasalahan sedimentasi di Wilayah Sungai Sulawesi Utara tidak hanya menimbulkan kerusakan serius pada infrastruktur pengairan darat seperti bendung, tetapi juga menjadi parameter kritis yang memicu degradasi lingkungan, abrasi, dan perubahan morfologi di kawasan pesisir hilirnya (Mananoma dkk, 2025). Kondisi lapangan pada Bendung Talawaan menunjukkan penumpukan sedimen yang berdampak pada ketidakefektifan debit air yang dialirkan. Material sedimen kasar berisiko memicu abrasi pada tubuh bendung, sementara sedimen halus berpotensi menyumbat mekanisme pintu air (Chanson, 2004).

Untuk memahami fenomena tersebut, diperlukan analisis karakteristik butiran sedimen pada Bendung Talawaan sebagai pendekatan ilmiah. Karakteristik butiran sedimen, seperti distribusi ukuran butir dan parameter statistiknya, dapat memberikan informasi mengenai proses transpor serta indikasi sumber sedimen. Melalui analisis ini, pola sedimentasi yang terjadi di Bendung Talawaan dapat diinterpretasikan secara lebih sistematis dan dapat dijadikan sebagai landasan teknis manajemen pengerukan dan konservasi DAS.

Penelitian ini dilakukan menggunakan metode analisis saringan yang mengacu pada SNI 3423:2008 untuk menentukan distribusi ukuran butir sedimen. Parameter yang dianalisis meliputi ukuran karakteristik sedimen (D10, D30, D50, D60, D85, D90), koefisien keseragaman (Cu) dan koefisien gradasi (Cc), serta parameter statistik Folk dan Ward (1957). Distribusi ukuran butir dan parameter statistik Folk dan Ward yang meliputi mean (Mz), sorting (σI), skewness (SkI), dan kurtosis (KG) dapat memberikan informasi mengenai proses transpor serta indikasi sumber sedimen (Folk & Ward, 1957; Blott & Pye, 2001). Hasil analisis diharapkan dapat memberikan gambaran sistematis mengenai karakteristik sedimen serta membantu mengidentifikasi indikasi sumber sedimen di Bendung Talawaan.

KAJIAN TEORI

Sedimen merupakan material padat hasil pelapukan batuan yang diangkut oleh media alami seperti air, angin, atau es. Dalam sistem sungai, sedimen umumnya berasal dari erosi di DAS yang kemudian diangkut aliran menuju hilir. Proses sedimentasi terjadi ketika energi aliran tidak lagi mampu mengangkut material sehingga terjadi pengendapan (Zuhri dkk, 2023). Menurut literatur hidrologi, proses sedimentasi dipengaruhi oleh kecepatan aliran, debit sungai, kemiringan dasar sungai, serta ukuran dan berat jenis butiran.

Karakteristik butiran sedimen merupakan aspek penting dalam memahami dinamika transpor dan pengendapan. Parameter utama meliputi ukuran butir, distribusi ukuran, bentuk butir, serta tingkat sortasi (Muhardi dkk, 2022). Untuk memberikan batasan klasifikasi fraksi sedimen, penelitian ini mengacu pada skala Wentworth (1922) seperti disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi Ukuran Butir Berdasarkan Skala Wentworth

Batasan Ukuran (mm)	Batasan Skala Phi (ϕ)	Klasifikasi Sedimen
>2,00	<-1	Kerikil / Granul (<i>Gravel</i>)
1,00–2,00	-1 s/d 0	Pasir Sangat Kasar (<i>Very Coarse Sand</i>)
0,50–1,00	0 s/d 1	Pasir Kasar (<i>Coarse Sand</i>)
0,25–0,50	1 s/d 2	Pasir Sedang (<i>Medium Sand</i>)
0,125–0,25	2 s/d 3	Pasir Halus (<i>Fine Sand</i>)
0,0625–0,125	3 s/d 4	Pasir Sangat Halus (<i>Very Fine Sand</i>)
<0,0625	>4	Lanau / Lempung (<i>Mud/Silt/Clay</i>)

Analisis saringan (sieve analysis) merupakan metode penentuan distribusi ukuran butir dengan menyaring sampel melalui serangkaian ayakan berukuran tertentu. Hasilnya disajikan dalam kurva distribusi ukuran butir, yaitu hubungan antara persentase lolos kumulatif dengan ukuran butir, yang menjadi dasar penentuan parameter karakteristik sedimen. Standar SNI 3423:2008 mengatur prosedur persiapan sampel, pengayakan, dan perhitungan distribusi secara terstandar.

Parameter distribusi ukuran butir dinyatakan dalam nilai D_x , yaitu ukuran butir pada persentase lolos tertentu (D_{10} , D_{30} , D_{50} , D_{60} , D_{85} , D_{90}). Nilai D_{50} merepresentasikan ukuran butir dominan (median). Koefisien gradasi terdiri atas Coefficient of Uniformity pada persamaan 1 dan Coefficient of Curvature pada persamaan 2.

$$(Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}) \quad (1)$$

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

Nilai C_u yang tinggi menunjukkan sedimen bergradasi baik (well graded), sedangkan nilai rendah menunjukkan sedimen seragam (uniform); rentang $1 < C_c < 3$ menunjukkan distribusi yang baik (Knighton, 1998).

Folk dan Ward (1957) mengembangkan metode statistik untuk menganalisis distribusi ukuran butir berbasis skala phi (ϕ), meliputi Mean (M_z) sebagai ukuran rata-rata, Sorting (σI) sebagai tingkat keseragaman, Skewness (Sk) sebagai kecenderungan distribusi, dan Kurtosis (K_g) sebagai ketajaman distribusi. Sortasi baik umumnya menunjukkan transpor yang lama atau selektif, sedangkan sortasi buruk mengindikasikan pencampuran material dari berbagai sumber. Sedimen kasar dengan sortasi buruk cenderung berasal dari sumber lokal seperti erosi tebing, sedangkan sedimen halus tersortir baik umumnya berasal dari sumber yang lebih jauh akibat transpor yang lebih panjang. Identifikasi sumber berbasis butiran bersifat indikatif dan tidak menentukan sumber secara spesifik tanpa analisis mineralogi atau geokimia.

METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan

- *Grab Sampler* manual / sekop *stainless steel*
- Mesin pengayak (*sieve shaker*)
- Susunan saringan standar SNI
- Oven pengering (suhu $\pm 105^\circ\text{C}$)
- Timbangan
- Kantong plastik polietilen kedap air
- Perangkat PC/Laptop dan *Software* pengolahan data untuk hasil pengujian laboratorium

Jalannya Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Bendung Talawaan yang membentang di aliran Sungai Talawaan. Penentuan titik pengambilan sampel dilakukan dengan metode *purposive sampling* dengan mempertimbangkan kondisi morfologi sungai, pola aliran, dan dinamika hidraulika di sekitar struktur bendung. Desain sampling dibagi menjadi dua orientasi, yaitu longitudinal (searah aliran) dan lateral (memotong aliran):

- Distribusi longitudinal (3 zona): Zona Hulu (*upstream*) untuk karakteristik sedimen asli dari DAS hulu; Zona Tengah; dan Zona Hilir (*downstream*).
- Distribusi lateral (3 posisi): Tepi kiri dan tepi kanan sungai (zona kecepatan rendah) serta tengah aliran (*thalweg/main channel*) yang berenergi tertinggi.

Kombinasi matriks longitudinal–lateral menghasilkan total 9 (sembilan) titik sampling. Sebaran titik pengambilan sampel ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Bendung dan Pengambilan Sample sedimen

Sampel material yang diambil dalam penelitian ini difokuskan pada sedimen dasar sungai (*bed load sample*). Material sedimen yang diambil kemudian ditiriskan dari air bebas tanpa membuang fraksi halus, dimasukkan ke dalam kantong polietilen kedap air, diberi kode label koordinat titik, lalu dibawa ke Laboratorium Mekanika Tanah Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Samratulangi Manado dengan mengacu pada standar SNI 3423:2008. Prosedur pengujian saringan mengacu pada SNI 3423:2008, meliputi: pengeringan sampel pada suhu $\pm 105^{\circ}\text{C}$ hingga berat konstan; penyusunan saringan bertingkat dari ukuran terbesar ke terkecil; pengayakan menggunakan sieve shaker selama ± 10 – 15 menit; penimbangan fraksi tertahan pada masing-masing saringan; serta perhitungan persentase berat tertahan dan persentase lolos kumulatif.

Analisis Data

Persentase berat tertahan dan persentase lolos kumulatif dihitung dengan persamaan 3.

$$\%tertahan = \frac{W_i}{W_{total}} \times 100 \quad (3)$$

dimana:

$$\begin{aligned} W_i &= \text{berat sedimen pada saringan ke-}i \\ W_{total} &= \text{total berat sampel} \end{aligned}$$

Persentase tertahan kumulatif :

$$\%tertahankumulatif = \sum \%tertahan \quad (2)$$

Persentase lolos kumulatif :

$$\%lolos = 100 - \%tertahankumulatif \quad (3)$$

Hasilnya disusun menjadi kurva distribusi ukuran butir (sumbu-X ukuran butir dalam skala logaritmik; sumbu-Y persentase lolos kumulatif). Nilai D_x ditentukan melalui pembacaan langsung dari kurva atau interpolasi logaritmik pada persamaan 4.

$$\log D_x = \log D_1 + \left(\frac{P_x - P_1}{P_2 - P_1} \right) (\log D_2 - \log D_1) \quad (4)$$

Koefisien gradasi dihitung sebagai, Coefficient of Uniformity (C_u) pada persamaan 5 dan Coefficient of Curvature (C_c) pada persamaan 6.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (5)$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (6)$$

Untuk analisis statistik, ukuran butir dikonversi ke skala phi ($\phi = -\log_2 d$, dengan d dalam mm), kemudian parameter statistik dihitung berdasarkan metode Folk dan Ward (1957).

$$Mean (M_z) = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3} \quad (7)$$

$$Sorting (\sigma) = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6} \quad (8)$$

$$Skewness (Sk) = \frac{(\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50})}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{(\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50})}{2(\phi_{95} - \phi_5)} \quad (9)$$

$$Kurtosis (K_g) = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})} \quad (10)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan terhadap sembilan sampel sedimen dasar yang mewakili sebaran spasial longitudinal (Hulu, Tengah, Hilir) dan lateral (Kiri, Tengah, Kanan). Data

mentah pengayakan diolah menggunakan interpolasi logaritmik untuk memperoleh diameter karakteristik, koefisien gradasi, dan parameter statistik Folk dan Ward.

Karakteristik Sedimen Zona Hulu Sungai

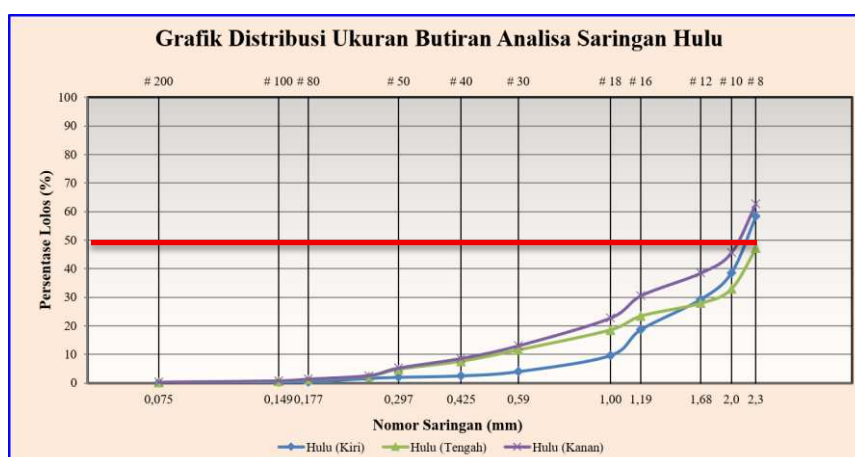
Pada zona hulu, material didominasi fraksi berbutir sangat kasar. Pias Hulu Kiri ($D_{50} = 2,17$ mm) dan Hulu Kanan ($D_{50} = 2,07$ mm) dikategorikan Pasir Sangat Kasar, sedangkan Hulu Tengah ($D_{50} = 2,37$ mm) tergolong Kerikil Halus. Nilai mean berkisar $-0,66$ hingga $-0,92 \phi$, membuktikan arus hulu yang kuat sehingga mampu mengangkut material bermassa berat. Sortasi bervariasi dari sedang-baik ($0,66$) pada sisi kiri hingga buruk pada poros tengah dan kanan, mengindikasikan pasokan sedimen dari erosi tebing hulu yang masif dan langsung. Skewness positif (jelek halus) menunjukkan masih terdapat material halus yang terjebak akibat pengendapan cepat (rapid deposition). Parameter gradasi dan statistik zona hulu disajikan pada Tabel 2, Tabel 3, dan Gambar 2.

Tabel 2. Parameter gradasi dan klasifikasi material dasar Zona Hulu

Titik Sampel	D10 (mm)	D30 (mm)	D60 (mm)	Cu	Cc	Klasifikasi (USCS)
Hulu Kanan	0,47	1,18	2,25	4,76	1,30	Pasir bergradasi buruk (SP)
Hulu Tengah	0,52	1,80	2,61	5,02	2,40	Pasir bergradasi buruk (SP)
Hulu Kiri	1,01	1,70	2,33	2,31	1,23	Pasir bergradasi buruk (SP)

Tabel 3. Parameter statistik sedimen metode Folk & Ward Zona Hulu

Titik Sampel	Mean/ $M_z(\phi)$	Sorting/ σI	Skewness/Sk	Kurtosis/ K_g
Hulu Kanan	$-0,66$ (Pasir Sangat Kasar)	1,00 (Buruk)	0,64 (Jelek Halus)	1,08 (Mesokurtik)
Hulu Tengah	$-0,90$ (Pasir Sangat Kasar)	1,04 (Buruk)	0,58 (Jelek Halus)	1,25 (Leptokurtik)
Hulu Kiri	$-0,92$ (Pasir Sangat Kasar)	0,66 (Sedang-Baik)	0,52 (Jelek Halus)	1,09 (Mesokurtik)



Gambar 2. Grafik distribusi ukuran butiran analisis saringan Zona Hulu

Karakteristik Sedimen Zona Tengah

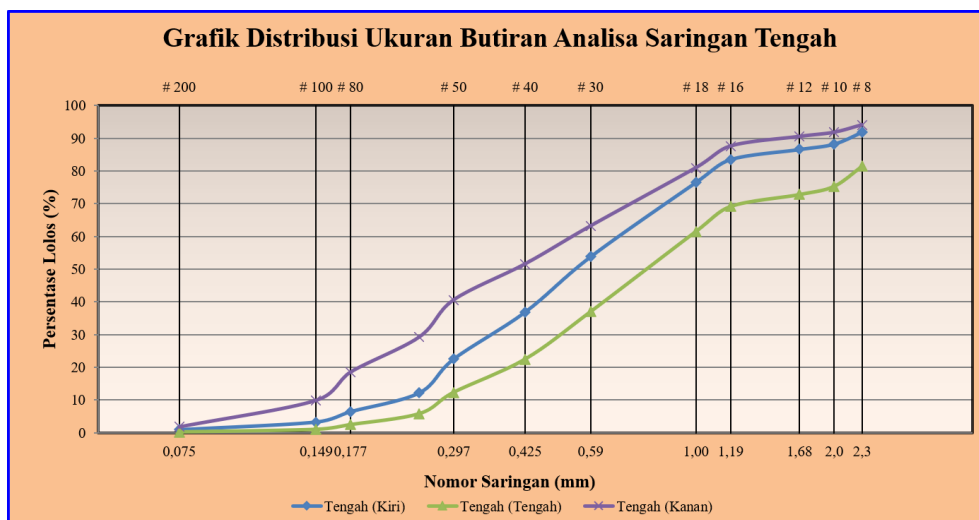
Memasuki segmen tengah yang merupakan kawasan transisi kolam genangan, terlihat penurunan dimensi material dasar secara merata. Tengah Kiri ($D_{50} = 0,55$ mm) dan Tengah Tengah ($D_{50} = 0,78$ mm) tergolong Pasir Kasar, sedangkan Tengah Kanan mengalami pengecilan menjadi Pasir Sedang ($D_{50} = 0,40$ mm). Mean naik menjadi +0,21 hingga +1,26 ϕ , menunjukkan abrasi antarbutiran selama transpor. Seluruh sampel menunjukkan sortasi buruk ($\sigma I > 1,00$), menandakan gangguan pola aliran berupa masuknya pasokan sedimen baru atau fluktuasi kecepatan arus yang memadukan material kasar dan halus. *Skewness* simetris hingga jelek negatif menandakan populasi butiran pasir kasar dan sedang yang mulai seimbang. Hasil lengkap disajikan pada Tabel 4, Tabel 5, dan Gambar 3.

Tabel 4. Parameter gradasi dan klasifikasi material dasar Zona Tengah

Titik Sampel	D10 (mm)	D30 (mm)	D60 (mm)	Cu	Cc	Klasifikasi (USCS)
Tengah Kanan	0,15	0,25	0,54	3,61	0,79	Pasir bergradasi buruk (SP)
Tengah Tengah	0,28	0,50	0,97	3,46	0,94	Pasir bergradasi buruk (SP)
Tengah Kiri	0,22	0,36	0,68	3,11	0,86	Pasir bergradasi buruk (SP)

Tabel 5. Parameter statistik sedimen metode Folk & Ward Zona Tengah

Titik Sampel	Mean / M_z (ϕ)	Sorting / σI	Skewness / S_k	Kurtosis / K_g
Tengah Kanan	1,26 (Pasir Sedang)	1,37 (Buruk)	-0,09 (Simetris)	0,98 (Mesokurtik)
Tengah Tengah	0,21 (Pasir Kasar)	1,28 (Buruk)	-0,11 (Jelek Kasar)	0,73 (Platikurtik)
Tengah Kiri	0,81 (Pasir Kasar)	1,17 (Buruk)	-0,10 (Simetris)	1,01 (Mesokurtik)



Gambar 3. Grafik distribusi ukuran butiran analisis saringan Zona Tengah

Karakteristik Sedimen Zona Hilir

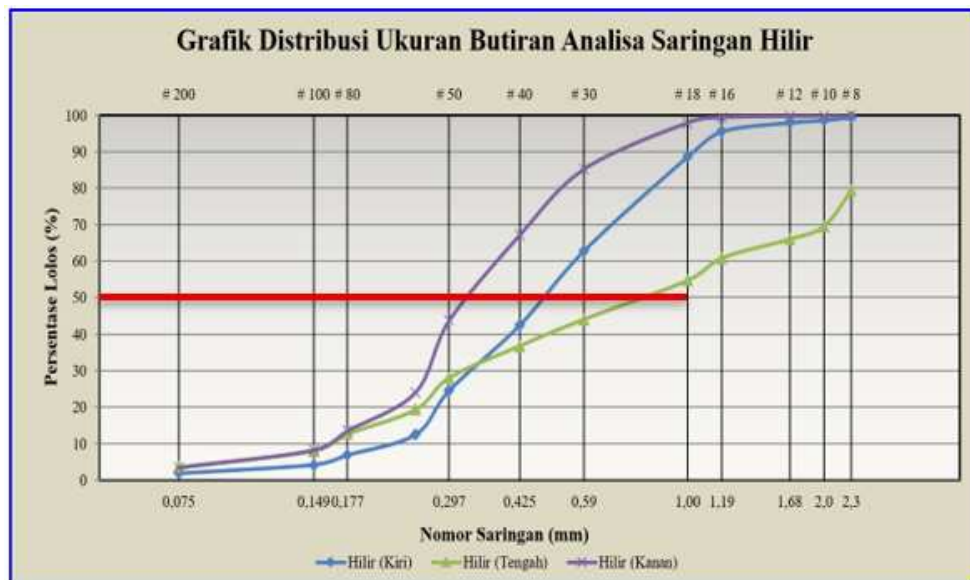
Segmen hilir yang berada tepat di area retensi depan tubuh bendung menunjukkan konsentrasi fraksi terhalus dengan diferensiasi lateral yang kontras. Hilir Kiri tergolong Pasir Sedang ($D_{50} = 0,48$ mm), Hilir Tengah (as sungai) bertahan sebagai Pasir Kasar ($D_{50} = 0,79$ mm), dan Hilir Kanan mengalami reduksi ekstrem menjadi Pasir Halus ($D_{50} = 0,33$ mm). Sektor tengah memiliki sortasi buruk ($\sigma I = 1,64$), sedangkan sektor tepi menunjukkan sortasi sedang ($0,89$), membuktikan pemisahan energi yang ekstrem: arus turbulen di tengah mengacak sedimen, sementara arus tenang di tepi memilah secara teratur. Anomali Hilir Tengah disebabkan efek penggerusan (*scouring*) limpasan bendung yang menyapu material halus di poros tengah. Hasil lengkap disajikan pada Tabel 6, Tabel 7, dan Gambar 4.

Tabel 6. Parameter gradasi dan klasifikasi material dasar Zona Hilir

Titik Sampel	D10 (mm)	D30 (mm)	D60 (mm)	Cu	Cc	Klasifikasi (USCS)
Hilir Kanan	0,16	0,26	0,38	2,42	1,15	Pasir bergradasi buruk (SP)
Hilir Tengah	0,16	0,32	1,16	7,25	0,56	Pasir bergradasi buruk (SP)
Hilir Kiri	0,21	0,33	0,56	2,63	0,91	Pasir bergradasi buruk (SP)

Tabel 7. Parameter statistik sedimen metode Folk & Ward Zona Hilir

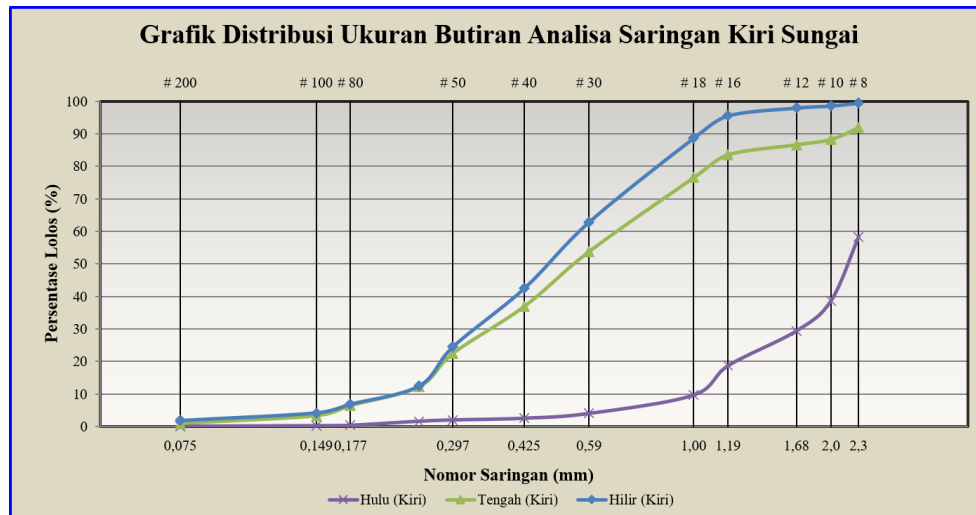
Titik Sampel	Mean / $M_z (\phi)$	Sorting / σI	Skewness / Sk	Kurtosis / K_g
Hilir Kanan	1,60 (Pasir Sedang)	0,89 (Sedang)	0,04 (Simetris)	1,39 (Leptokurtik)
Hilir Tengah	0,43 (Pasir Kasar)	1,64 (Buruk)	0,16 (Jelek Halus)	0,69 (Platikurtik)
Hilir Kiri	1,04 (Pasir Sedang)	0,89 (Sedang)	0,04 (Simetris)	0,89 (Platikurtik)



Gambar 4. Grafik distribusi ukuran butiran analisis saringan Zona Hilir

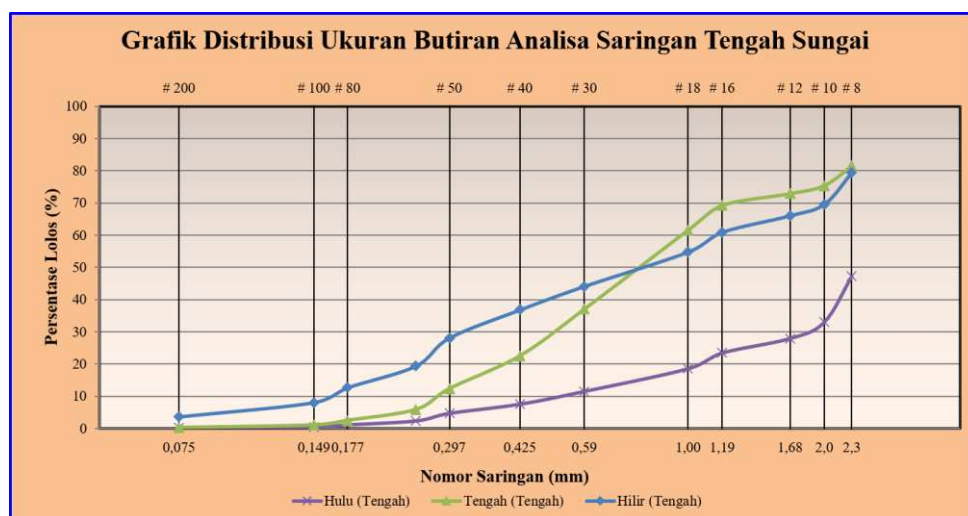
Analisis Kurva Distribusi Saringan dan Fenomena *Downstream Fining*

Analisis geometrik kurva logaritmik kelolosan saringan secara konsisten menunjukkan pergeseran kurva dari kanan-bawah (fraksi kasar) ke kiri-atas (fraksi halus). Tren ini menjadi bukti kuantitatif terjadinya fenomena *downstream fining*, yaitu pengecilan ukuran butir sedimen dasar searah aliran menuju hilir, yang dipicu efek air balik (*backwater effect*) Bendung Talawaan. Visualisasi pergeseran karakteristik gradasi pada ketiga pias lateral disajikan pada Gambar 5, Gambar 6, dan Gambar 7.



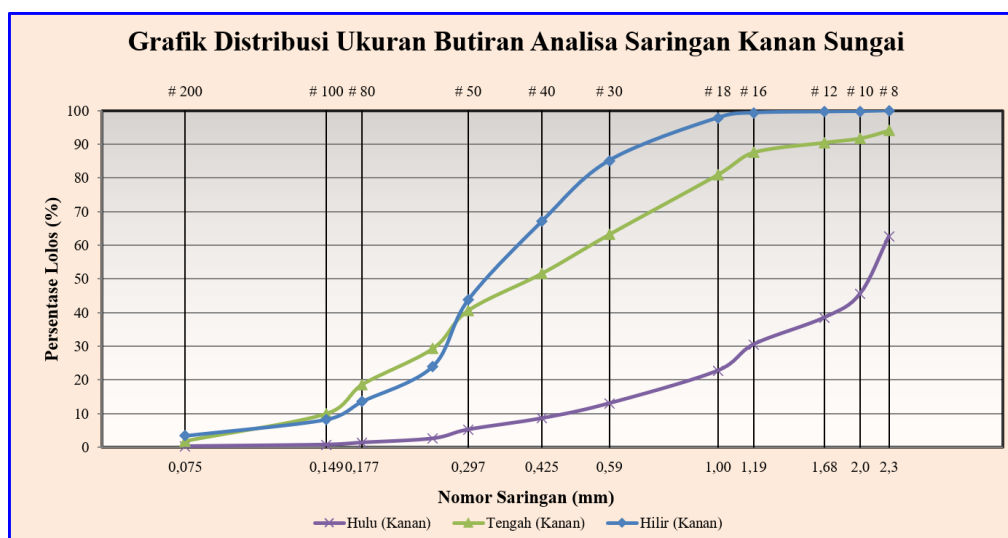
Gambar 5. Distribusi ukuran butiran longitudinal sisi kiri sungai (area intake)

Pada sisi kiri (Gambar 5), kelolosan kumulatif pada saringan 2,30 mm melonjak dari 58,32% di Hulu Kiri menjadi 91,88% di Tengah Kiri, dan mencapai 98,60% di Hilir Kiri tepat di depan bangunan *intake*. Pola penghalusan longitudinal berjalan ideal seiring penurunan energi aliran menuju bendung.



Gambar 6. Distribusi ukuran butiran longitudinal as sungai (thalweg)

Pada as sungai (Gambar 6), Hulu Tengah bertindak sebagai gerbang pasokan utama dengan kelolosan saringan 2,30 mm terendah di seluruh penelitian (47,16%), menandakan dominasi kerikil. Memasuki area waduk, kurva Tengah Tengah dan Hilir Tengah berimpit rapat pada kelas pasir kasar (kelolosan 79–81%), menunjukkan kerikil hulu kehilangan daya angkut dan mengendap sebelum mencapai as tengah bendung.



Gambar 7. Distribusi ukuran butiran longitudinal sisi kanan sungai

Sisi kanan (Gambar 7) menyajikan tren *downstream fining* paling ekstrem akibat morfologi sisi dalam belokan. Kelolosan saringan 2,30 mm meningkat dari 62,68% (Hulu Kanan) menjadi 94,08% (Tengah Kanan), hingga 99,96% di Hilir Kanan (tanpa fraksi kerikil tersisa) dengan D50 minimum 0,33 mm.

Secara hidraulik, fenomena ini menegaskan bekerjanya hukum *backwater effect*. Elevasi muka air yang tertahan mercu memperluas penampang basah dan menurunkan kecepatan aliran secara drastis, sehingga gaya seret dasar (τ_0) turun di bawah tegangan geser kritis (τ_{cr}) menurut diagram Shields. Material kerikil halus (D50 = 2,37 mm) kehilangan momentum dan mengendap lebih awal di segmen hulu–tengah, sedangkan fraksi halus tetap tertransport hingga area depan dinding bendung, menciptakan kurva kelolosan yang tinggi dan tegak di segmen hilir.

Analisis Variasi Lateral dan Hidraulika Sungai

Analisis parameter Folk dan Ward pada segmen hilir mengonfirmasi pembagian zona hidraulik yang kontras. Stasiun Hilir Tengah tetap berupa pasir kasar (D50 = 0,79 mm) meskipun berdekatan dengan tubuh bendung, membuktikan poros tengah sebagai jalur arus utama (*thalweg*). Debit harian (*base flow*) yang terkonsentrasi menghasilkan kecepatan geser tinggi yang menyapu (*flushing*) fraksi halus melewati mercu, terekam pada sortasi buruk ($\sigma I = 1,64$) dan kurva *platykurtic* ($K_g = 0,69$). Sebaliknya, Hilir Kanan mencatat D50 terkecil (0,33 mm) dan bertindak sebagai zona mati (*dead-water zone*) pada

sisi dalam belokan, dengan reduksi kecepatan ekstrem yang menghasilkan sortasi lebih baik (*moderately sorted*, $\sigma I = 0,89$) dan kurva *leptokurtic* ($K_g = 1,39$).

Identifikasi Sumber Sedimen

Penelusuran asal material dilakukan dengan mengorelasikan parameter fisik hasil uji saringan (C_u , C_c , σI) dengan kondisi tata guna lahan dan geologi DAS Talawaan (luas tangkapan $\pm 134 \text{ km}^2$, menurut data regional yang dilaporkan dalam dokumen penelitian — angka ini sebaiknya diverifikasi pada sumber resmi pengelola DAS). Karakteristik sebaran butiran membuktikan akumulasi sedimen tidak hanya dipasok oleh pelapukan batuan alami, melainkan dipicu pula oleh aktivitas antropogenik di sepanjang koridor sungai.

Klaster sumber internal (alami)

Pasokan awal *bed load* berasal dari rombakan lereng barat–barat daya Gunung Klabat. Stasiun Hulu Tengah teridentifikasi sebagai kerikil bergradasi baik (*well-graded gravel*, GW) dengan $C_u = 5,02$ (> 4) dan $C_c = 2,40$ (rentang ideal 1–3), mengonfirmasi pasokan batuan vulkanik basaltik-andesitik melalui erosi tebing dan dasar sungai saat debit banjir.

Klaster sumber eksternal (antropogenik)

Buruknya indeks pemilahan di segmen tengah ($\sigma I = 1,17$ – $1,37$, *poorly sorted*) menandakan masuknya material asing di luar kapasitas seleksi hidraulis sungai (*supply shock*). Berdasarkan rona lingkungan regional, terdapat tiga aktivitas yang berperan sebagai pemasok sekunder: Pertambangan Emas Tanpa Izin (PETI) di Tatelu–Dimembe yang membuang *tailing* dan lumpur pencucian; penambangan pasir (Galian C) di Kecamatan Talawaan–Mapanget yang merusak lapisan pelindung dasar (*armoring layer*) dan membuang *slurry* padat fraksi pasir; serta alih fungsi lahan dan proyek infrastruktur koridor Minahasa Utara–Manado yang memicu erosi permukaan (*sheet erosion*).

Tabel 8. Matriks sintesis sumber sedimen berdasarkan karakteristik laboratorium

Zona Spasial DAS	Karakteristik Hasil Uji	Indikasi Sumber & Aktivitas	Dampak Fisis pada Bendung
Hulu DAS (Hulu Kiri/ Tengah/ Kanan)	D ₅₀ = 2,07–2,37 mm; Well-Graded Gravel (GW) di Hulu Tengah ($C_u = 5,02$; $C_c = 2,40$); Sorting buruk–sedang	Denudasi alami lereng vulkanik Gunung Klabat dan erosi tebing (bank erosion) pias atas; transpor sebagai bed load saat banjir	Memasok fraksi kerikil dan pasir sangat kasar yang mengendap di ujung kolam genangan
Segmen Tengah (Area Transisi)	D ₅₀ = 0,40–0,78 mm; Poorly Graded Sand (SP); Poorly Sorted ($\sigma I = 1,17$ – $1,37$)	Penambangan pasir Galian C, tailing PETI Tatelu–Dimembe, dan alih fungsi lahan (supply shock antropogenik)	Pencampuran paksa fraksi kasar alami dengan fraksi halus tambang; pendangkalan area transisi

Zona Spasial DAS	Karakteristik Hasil Uji	Indikasi Sumber & Aktivitas	Dampak Fisis pada Bendung
Segmen Hilir (Kolam Bendung)	D50 = 0,33–0,79 mm; Gap-Graded ($C_c = 0,91$) di Hilir Kiri; Poorly–Moderately Sorted	Penurunan gaya seret akibat backwater effect mercu bendung; pengendapan terpaksa (forced deposition)	Pengendapan pasir sedang di depan intake (D50 = 0,48 mm) dan pasir halus di zona mati Hilir Kanan (D50 = 0,33 mm)

Kombinasi pasokan internal dan eksternal melahirkan mekanisme pengendapan paksa (*forced deposition*). Komponen batuan kasar hulu (GW) runtuh dan mengendap lebih awal di ujung genangan, sedangkan fraksi pasir sedang–halus dari aktivitas tambang tetap melayang dan mengendap massal di depan dinding bendung. Fraksi antropogenik inilah yang membentuk gradasi buruk terputus (*gap-graded*, $C_c = 0,91$) pada Hilir Kiri serta tumpukan tajam (*leptokurtic*, $K_g = 1,39$) pada Hilir Kanan.

Evaluasi Dampak Teknis terhadap Operasional Bendung

Bangunan intake dan pintu penguras Bendung Talawaan ditempatkan pada sisi kiri aliran (Hilir Kiri). Sedimen di depan intake didominasi pasir sedang (D50 = 0,48 mm; $M_z = 1,04 \phi$) dengan $C_u = 2,62$ dan $C_c = 0,91$. Nilai $C_c < 1$ membuktikan karakteristik gradasi buruk terputus (*gap-graded*) akibat seleksi hidraulis lateral arus belokan dan bukaan pintu intake. Akumulasi ini memicu tiga risiko teknis: penyumbatan saringan sampah (trashrack clogging) yang mereduksi debit pengambilan; abrasi mekanis pintu dan struktur beton akibat pasir sedang yang bergerak dinamis; serta pendangkalan saluran primer irigasi karena pasir 0,48 mm mengendap di sepanjang dasar saluran sub-kritis, menurunkan keandalan suplai air ke areal persawahan.

Rekomendasi Teknis Pengelolaan Sedimen

Diperlukan penanganan terpadu struktural dan non-struktural. Secara struktural, pembilasan hidraulis berkala (hydraulic flushing) dilakukan dengan membuka pintu penguras kiri secara penuh pada awal musim penghujan untuk membangkitkan kembali tegangan geser da (τ_0) di atas nilai kritisnya (τ_{cr}) sehingga endapan *gap-graded* di depan intake terbilas; pengerukan mekanis (dredging) berkala pada area ujung genangan menjaga volume tampungan efektif. Secara non-struktural, diperlukan pengetatan pengawasan Galian C dan PETI di Kecamatan Dimembe, Tatelu, dan Mapanget, kewajiban kolam pengendap (settling pond) pada lokasi pencucian pasir, serta reboisasi lahan kritis lereng Gunung Klabat untuk menekan erosi permukaan.

KESIMPULAN

Hasil analisis saringan terhadap 9 sampel bed load Sungai Talawaan membuktikan secara fisis terjadinya fenomena *downstream fining* (pengecilan ukuran butir searah aliran) akibat efek air balik Bendung Talawaan. Sisi kiri sungai (area intake) menunjukkan gradasi buruk terputus (*gap-graded*) yang didominasi

pasir sedang dengan pola penghalusan longitudinal ideal; sisi kanan (sisi dalam belokan) mengalami akumulasi pasir halus berpola leptokurtic sebagai zona mati; sedangkan as sungai (*thalweg*) mempertahankan pasir kasar berpola platykurtic karena pembilasan kontinu debit harian. Diameter median menurun dari 2,07–2,37 mm di hulu menjadi 0,33–0,79 mm di hilir. Akumulasi sedimen di Bendung Talawaan dipasok secara simultan oleh dua klaster sumber, yaitu sumber internal alami berupa pecahan batuan vulkanik lereng Gunung Klabat (terindikasi well-graded gravel pada Hulu Tengah dengan $C_u = 5,02$ dan $C_c = 2,40$) dan sumber eksternal antropogenik (terindikasi sortasi buruk $\sigma I = 1,17$ – $1,37$ di segmen tengah) yang berasal dari penambangan pasir Galian C, tailing PETI, dan alih fungsi lahan. Untuk menjaga keberlanjutan fungsi layanan bendung diperlukan pembilasan hidraulis berkala, pengerukan zona transisi, dan pengendalian aktivitas DAS secara terpadu.

DAFTAR PUSTAKA

- Azmeri, A., Basri, H., Sundary, D., Endang, Y. E. C., & Jemi, F. Z. (2020). Hidrodinamika Dan Produk Sedimen Terhadap Bendung Irigasi Keumala, Sungai Krueng Baro, Provinsi Aceh. *Jurnal Irigasi*, 15(1), 1-14.
- Blott, S. J., & Pye, K. (2001). GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth surface processes and Landforms*, 26(11), 1237-1248.
- Chanson, H. (2004). *The hydraulics of open channel flow: an introduction* (2nd ed.). Elsevier Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-5978-9.X5000-4>
- Folk, R. L., & Ward, W. C. (1957). Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *Journal of sedimentary research*, 27(1), 3-26.
- Hairan, M. H., Jamil, N. R., Azmai, M. N. A., Looi, L. J., Aris, A. Z., & Rosli, M. H. (2023). The analysis of large dam impacts on sediment grain size distribution in a tropical river system. *Civil Eng J*, 9, 15-26.
- Mananoma, T., Makasaehe, D., Manalip, E., & Wallah, B. (2025). Analisis Prioritas Penanganan Pantai Bagian Utara WS Dumoga–Sangkub Menggunakan Metode AHP. *EduTIK: Jurnal Pendidikan Teknologi Informasi dan Komunikasi*, 5(6), 2471-2482.
- Morris, G. L., & Fan, J. (1998). *Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use*. (No Title).
- Muhardi, M., Nurrahman, Y. A., Risko, R., Muliadi, M., Rahayu, K., & Susiati, H. (2022). Statistical parameters analysis of sediment grain size from raya river bengkayang regency, West Borneo. *Bulletin of the Marine Geology*, 36(2), 380938.
- Soewarno, S. (1991). *Hidrologi Pengukuran dan Pengolahan Data Aliran Sungai (Hidrometri)*. Nova, Bandung, hal. xx, 825.
- Soulsby, R. L. (1995). *Erosion and Sedimentation*. By PY JULIEN. Cambridge University Press, 1995. 280 pp. ISBN 0-521-44237-0. £ 35. *Journal of Fluid Mechanics*, 304, 373-374.

- Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The journal of geology*, 30(5), 377-392.
- Zuhri, M. I. S., Sisingih, D., & Asmaranto, R. (2023). Analisis angkutan sedimen Sungai Welang Pasuruan menggunakan aplikasi HEC-RAS. *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sumber Daya Air*, 3(1), 57-66.