

Analisis Transpor Sedimen Dasar Sungai Alopohu yang Bermuara di Danau Limboto

A.A.O. Asri^{a*}, R. Husnan^a dan K.A. Utama^a

^aJurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Negeri Gorontalo, Gorontalo, Indonesia 96554

* Corresponding author's e-mail: aristiayuningsi@ung.ac.id

Received: 19 Sep 2024; revised: 18 Jun 2025; accepted: 12 Jul 2025

Abstract: One of the causes of flooding in Gorontalo is the reduced capacity of Lake Limboto, which has served as a natural water reservoir and flood preventer, to perform these functions effectively due to siltation. This diminished capacity is attributable to the deposition of sedimentary material carried by the rivers that drain into Lake Limboto. A total of 23 rivers discharge into Lake Limboto, contributing sedimentation on an annual basis. Among these, the Alopohu River is one of the most significant contributors. The objective of this study was to quantify the sediment transport generated by the Alopohu River. The analysis was conducted through the collection of direct measurement observation data in the downstream region of the Alopohu River, with the objective of obtaining data on river geometry, flow velocity, instantaneous discharge, and bottom sediment samples. Laboratory tests were conducted on basic sediment samples in order to ascertain the characteristics of the sediment grains. The data were subsequently analyzed using empirical formulas, namely the Meyer-Peter and Muller, Einstein, and Frijlink formulas. The quantity of bed sediment transport (bed load) in the downstream Alopohu River, as determined by discharge measurements and the application of the Meyer-Peter and Muller formula, is 2.86 tons per year. The Einstein formula yields a value of 621 tons per year, while the Frijlink formula produces a result of 54.67 tons per year. The discrepancy in the calculated values for each empirical formula is attributed to the specific parameters utilized in each formula.

Keywords: sedimentation, Alopohu river, Meyer-Peter and Muller, Einstein, Frijlink

Abstrak: Salah satu penyebab Banjir di Gorontalo adalah karena berkurangnya kapasitas tampung Danau Limboto sebagai wadah penampungan air alami dan pencegah terjadinya banjir mengalami pendangkalan. Berkurangnya kapasitas tampung ini disebabkan oleh sedimentasi yang dihasilkan oleh sungai-sungai yang bermuara di Danau Limboto. Sebanyak 23 Sungai yang bermuara ke Danau Limboto dan terus menyumbang sedimentasi setiap tahunnya, salah satu sungai terbesar yang bermuara di Danau Limboto adalah Sungai Alopohu. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis besar transpor sedimen dasar yang dihasilkan oleh Sungai Alopohu. Analisis dilakukan dengan mengumpulkan data observasi pengukuran secara langsung di hilir Sungai Alopohu untuk mendapatkan data geometri sungai, kecepatan aliran, debit sesaat dan sampel sedimen dasar. Uji laboratorium dilakukan terhadap sampel sedimen dasar untuk mendapatkan karakteristik butiran sedimen. Data-data yang diperoleh selanjutnya dianalisis menggunakan rumus empiris yaitu Meyer-Peter dan Muller, Einstein dan Frijlink. Besar angkutan sedimen dasar (bed load) di hilir Sungai Alopohu berdasarkan data debit pengukuran dengan formula Meyer-Peter dan Muller adalah 2,86 ton/tahun; formula Einstein sebesar 621 ton/tahun serta formula Frijlink sebesar 54,67 ton/tahun. Perbedaan besaran muatan untuk setiap rumus empiris disebabkan oleh parameter setiap rumus empiris.

Kata kunci: Sedimentasi, Sungai Alopohu, Meyer-Peter dan Muller, Einstein, Frijlink

1. Pendahuluan

Danau Limboto merupakan sumber daya alam di Provinsi Gorontalo yang berfungsi sebagai penyedia air bersih dan irigasi, pengatur fungsi hidrologi, pencegah banjir, tempat pariwisata bahkan sumber mata pencaharian masyarakat sekitar [1-3]. Kondisi Danau Limboto sekarang mengalami pendangkalan yang signifikan dan dikategorikan sebagai 15 danau prioritas nasional oleh KLHK [4-5]. Menurut Kepala Bidang Pengkajian dan Penataan Lingkungan Badan Lingkungan Hidup dan Riset Daerah (BLHRD) Provinsi Gorontalo, setiap tahunnya Danau Limboto mengalami pendangkalan sebesar 46,6 cm atau sekitar 0,0054 cm per jam [6]. Pendangkalan yang terjadi terus-menerus berdampak pada kapasitas tampung yang semakin berkurang, sehingga Danau Limboto dalam fungsinya tidak akan berjalan maksimal.

Pendangkalan Danau Limboto sebagian besar disebabkan oleh sedimentasi dari 23 sungai yang bermuara ke danau [7-8]. Sungai Alo merupakan sungai yang

berpotensi besar membawa sedimentasi dari hulu ke Danau Limboto [9-12]. Pertemuan aliran Sungai Alo, Sungai Puhu, dan Sungai Reksonegoro membentuk satu sistem Sungai Alopohu yang bermuara langsung di Danau Limboto. Sehingga dilakukan analisis transport sedimen dasar (*bed load*) di Sungai Alopohu dengan menggunakan rumus empiris *Meyer-Peter dan Muller, Einstein* dan *Frijlink*. Formula *Meyer-Peter dan Müller* (MPM), yang umum digunakan untuk memperkirakan transportasi sedimen, dapat berhasil diterapkan pada berbagai kondisi hidraulik [13].

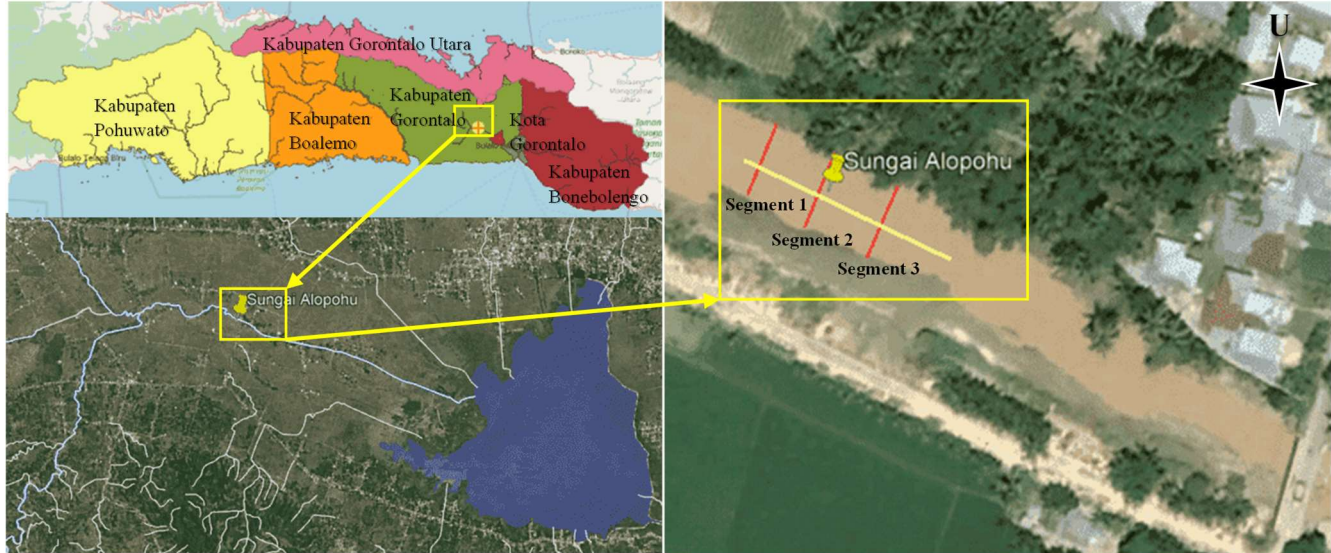
Sedimen dasar (*bed load*) adalah sedimen dengan ukuran butiran besar yang bergerak disepanjang aliran sungai tapi tidak dapat terangkat atau melayang. Pergerakan sedimen di dasar sungai (*bed load*) tidak berlangsung secara konstan, tapi cenderung terjadi secara tidak teratur [14-16].

2. Metode Penelitian

2.1. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berada di hilir Sungai Alopohu yang langsung bermuara ke Danau Limboto (Gambar 1). Sungai Alopohu memiliki panjang 22 km. Sungai ini melewati

Kecamatan Limboto Barat dan Kecamatan Bongomeme serta melewati beberapa desa, yaitu Desa Hutabohu, Tunggulo, Tenilo, Limehu, Moahudu, Ilomangga, Limehe Timur dan Teratai.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian

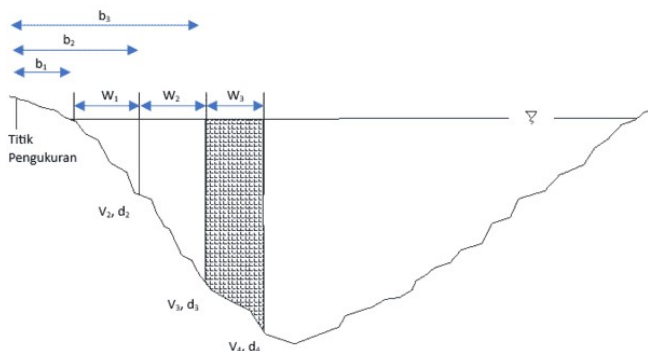
2.2. Data

Bahan penelitian yang digunakan pada penelitian meliputi sampel sedimen dasar, kecepatan aliran, geometri sungai, peta topografi. Sampel sedimen diperoleh langsung di lapangan dan diuji di laboratorium Teknik Sipil Universitas Negeri Gorontalo. Data kecepatan aliran dan geometri sungai diukur langsung di lapangan menggunakan alat *current meter* dan rol meter. Peta topografi diamati menggunakan *google earth* dan dicocokkan dengan peta kontur yang diperoleh dari Balai Wilayah Sungai Sulawesi II untuk keperluan menghitung kemiringan sungai.

2.3. Metode dan Tahapan Penelitian

2.3.1 Analisis Debit

Pengukuran debit sungai dilakukan dengan membagi lebar sungai menjadi sejumlah pias. Menggunakan metode tampang rerata untuk menghitung debit [17]. Metode tampang rerata ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Metode tampang rerata

Luas tampang pias x dan $x + 1$

$$CA_{x-x+1} = \frac{d_x + d_{x+1}}{2} W_x \quad (1)$$

Debit melalui pias x dan $x + 1$

$$q_{x-x+1} = \left(\frac{\bar{V}_x + \bar{V}_{x+1}}{2} \right) \left(\frac{d_x + d_{x+1}}{2} \right) W_x \quad (2)$$

2.3.2 Analisis Sedimen Dasar

Analisis sedimen dasar dapat menampilkan ukuran butiran tanah dasar yang didapatkan dari hasil pengujian analisis saringan di laboratorium. Analisis sedimen dasar menggunakan metode perhitungan sebagai berikut.

a) Persamaan Meyer-Peter dan Muller

Persamaan Meyer-Peter dan Muller didasarkan pada hasil eksperimental yang minim. Metode ini memperhitungkan faktor gesekan tersebut dan dengan didukung oleh data pengukuran dengan range data yang cukup besar, Meyer-Peter dan Muller memperoleh persamaan [18-19]:

$$\gamma R_h \left(\frac{k}{k_t} \right)^{\frac{3}{2}} S - 0,047 (\gamma_s - \gamma) d_m = 0,25 \left(\frac{\gamma}{g} \right)^{\frac{1}{3}} (q'_B)^{\frac{2}{3}} (3)$$

b) Persamaan Einstein

Einstein menetapkan persamaan muatan dasar sebagai persamaan yang menghubungkan material dasar dengan pengaliran setempat (*local flow*). Secara umum metode pendekatan Einstein didasarkan pada dua konsep dasar [18-19]: 1) Konsep kondisi kritis ditiadakan, karena kondisi kritis untuk awal gerak sedimen sangat sulit untuk didefinisikan dan 2) Angkutan sedimen dasar

lebih dipengaruhi oleh fluktuasi aliran yang terjadi dari pada nilai rerata gaya aliran yang bekerja pada partikel sedimen.

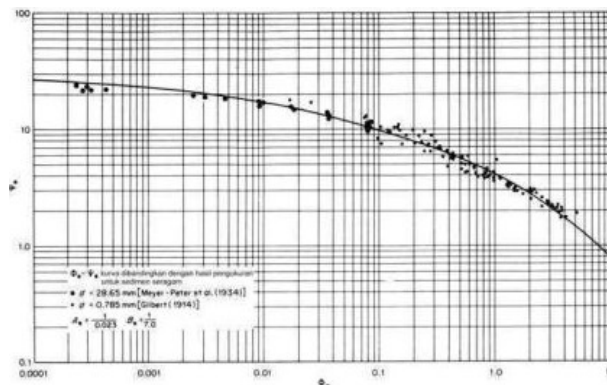
$$F(\phi, \Psi) = 0 \quad (4)$$

Pendekatan yang dilakukan adalah dengan metode statistik dengan konsep yang sangat kompleks, namun penggunaan menjadi relatif mudah dengan menggunakan bantuan grafik.

$$\Psi = \frac{\Delta d_{35}}{\mu_{RS}} \quad (5)$$

$$\phi = \frac{q_B}{\rho_s \Delta^2 (g d_{35})^2} \quad (6)$$

Hubungan antara Φ dan Ψ secara grafis dapat ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Einstein

c) Persamaan Frijlink

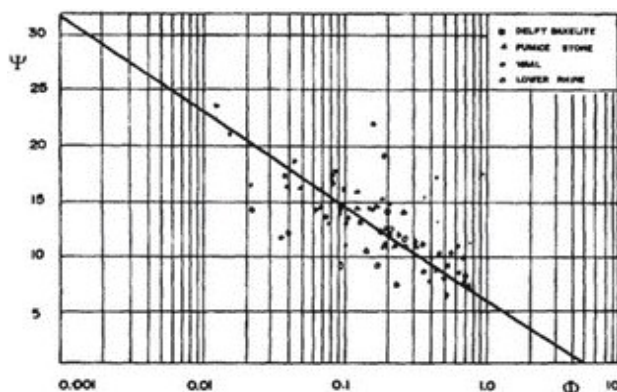
Teori Frijlink mengusulkan bahwa persamaan angkutan sedimen haruslah memperhitungkan pengaruh konfigurasi dasar sungai. Frijlink memperkuat teori Einstein, dimana Frijlink menjabarkan nilai *ripple* faktor dengan persamaan sebagai berikut [18-19].

$$\mu = \left(\frac{c}{c_{d90}} \right)^2 \quad (7)$$

Frijlink pada tahun 1950 menurunkan persamaan angkutan sedimen dasarnya sebagai berikut.

$$Tb = d_m \sqrt{g \mu Ri} 5e^{-2} \frac{\Delta dm}{\mu Ri} \quad (8)$$

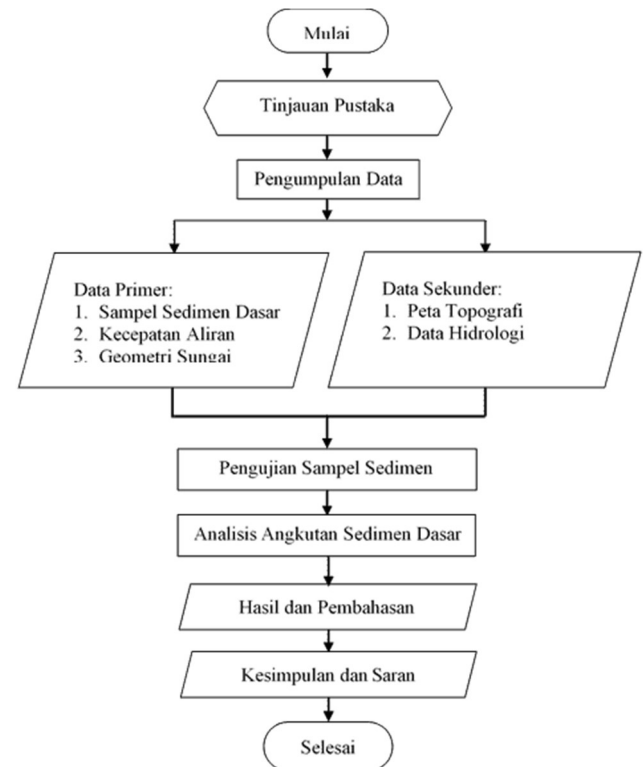
Persamaan Frijlink juga bisa diselesaikan secara grafis dapat ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik Frijlink

2.3.3 Tahapan Penelitian

Penelitian melalui tahap pengumpulan data di lapangan berupa sampel sedimen dasar, kecepatan aliran dan geometri sungai (Gambar 5). Dilakukan uji sampel sedimen dasar dengan melakukan pengujian berat jenis butiran (x_s), pengujian kadar air, pengujian kadar lumpur dan pengujian berat volume.



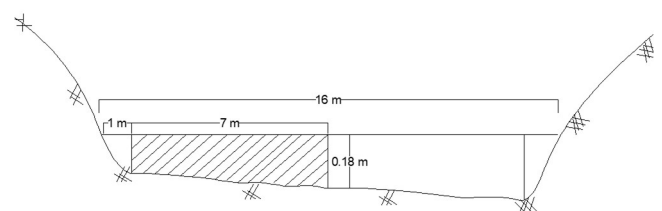
Gambar 5. Tahapan penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Geometri Sungai

3.1.1 Penampang Sungai

Perhitungan luas penampang sungai dilakukan dengan mengukur tinggi muka air sungai dan lebar sungai. Pengukuran kedalaman aliran dilakukan pada beberapa segmen, dimana setiap segmennya terdapat tiga titik pengukuran. Pengukuran debit didasarkan pada metode tampang merata, sehingga luas penampang dapat dihitung menggunakan Persamaan 2. Sketsa luas penampang basah pada segmen 1 ditampilkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Penampang basah melintang Segmen 1

Hasil pengukuran luas penampang ditampilkan pada Tabel 1.

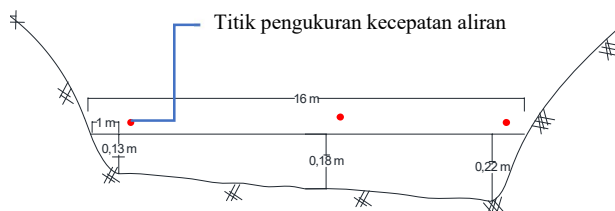
Tabel 1. Luas penampang basah saluran sungai

Segmen	Luas (m ²)
1	2,66
2	3,91
3	3,70
Rerata	3,42

Berdasarkan Tabel 1 luas penampang basah saluran sungai terbesar berada di segmen 2 yaitu 3,91 m² dan nilai terkecil berada pada segmen 1 yaitu 2,66 m², dengan luas rerata adalah 3,42 m². Kedalaman sungai dan lebar sungai berpengaruh terhadap besaran luas penampang sungai yang didapat. Semakin dalam dan semakin lebar sungai, maka semakin besar pula luas penampang sungai yang didapat. Sungai yang lebar dan dalam memberi kemampuan mengalirkan air dengan baik, begitu pula sebaliknya. Sungai Alopohu memiliki luas penampang yang kecil dengan keadaan yang relatif kecil sehingga terdapat ketidak seimbangan transpor sedimen yang berakibat terjadinya sedimentasi di hilir. Hal ini menyebabkan menurunnya kapasitas tampang sungai.

3.1.2 Kecepatan Aliran Sungai

Pengukuran kecepatan aliran menggunakan current meter dengan kedua baling-baling berputar terhadap sumbu horizontal. Metode pengukuran kecepatan aliran menggunakan current meter dengan meletakkan alat di tiap titik pengukuran, kemudian diukur kedalaman air. Kedalaman aliran rata-rata <0,75 m, maka baling-baling ditempatkan pada kedalaman 0,6 h. Titik Pengukuran kecepatan aliran dapat ditampilkan pada Gambar 7.


Gambar 7. Titik pengukuran kecepatan aliran sungai

Waktu pada alat ditentukan selama 40 detik. Nilai n didapat dari jumlah putaran dibagi waktu persatuan detik. Kecepatan didapat dari konversi jumlah putaran persatuan waktu. Hasil pengukuran kecepatan aliran ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2 menampilkan bahwa jumlah putaran berpengaruh terhadap kecepatan. Semakin banyak jumlah putaran, maka semakin besar nilai kecepatan aliran. Nilai kecepatan terbesar terletak pada segmen 1 titik 2 yaitu sebesar 0,42 m/det dengan jumlah putaran 59 kali. Sedangkan nilai kecepatan terkecil terletak pada segmen 3 titik 3 sebesar 0,06 m/det dengan jumlah putaran 4 kali. Kecepatan rerata dapat ditampilkan pada Tabel 3.

Kecepatan tiap segmen didapat dari hasil rerata kecepatan tiap titik dalam satu segmen. Hasil pengukuran kecepatan tiap segmen diperlukan untuk menentukan besarnya debit yang terjadi.

Tabel 2. Pengukuran Kecepatan Aliran (m/det)

Segmen 1						
Penempatan Alat	Jumlah Putaran (kali)	Waktu (detik)	n	Arah Horizontal Penampang		
				Titik 1	Titik 2	Titik 3
				Tinggi Muka Air (m)		
				0.13	0.18	0.22
0,6 h = 0.08	20	40	0.5	0.16		
0,6 h = 0.11	59	40	1.48		0.42	
0,6 h = 0.13	36	40	0.9			0.27
Rata-rata				0.28		
Segmen 2						
Penempatan Alat	Jumlah Putaran (kali)	Waktu (detik)	n	Arah Horizontal Penampang		
				Titik 1	Titik 2	Titik 3
				Tinggi Muka Air (m)		
				0.14	0.35	0.71
0,6 h = 0.08	35	40	0.88	0.26		
0,6 h = 0.21	46	40	1.15		0.33	
0,6 h = 0.43	18	40	0.45			0.15
Rata-rata				0.25		
Segmen 3						
Penempatan Alat	Jumlah Putaran (kali)	Waktu (detik)	n	Arah Horizontal Penampang		
				Titik 1	Titik 2	Titik 3
				Tinggi Muka Air (m)		
				0.23	0.36	0.41
0,6 h = 0.14	10	40	0.25	0.10		
0,6 h = 0.22	50	40	1.25		0.36	
0,6 h = 0.25	4	40	0.1			0.06
Rata-rata				0.17		

Tabel 3. Kecepatan rerata

Segmen	Kecepatan (m/det)
1	0.28
2	0.25
3	0.17
Rata-rata	0.23

3.1.3 Karakteristik Sedimen Dasar

Karakteristik sedimen dasar didapat dengan melakukan pengujian di laboratorium dari sampel sedimen yang diambil pada lokasi penelitian. Pengujian laboratorium yang dilakukan berupa analisis saringan, berat jenis, berat volume, kadar lumpur dan kadar air.

Tabel 4. Hasil analisis saringan butiran sedimen

No	Sampel Uji	Diameter Butiran			
		d35	d50	d65	d90
1	Segmen 1				
	Titik 1	0.65	1.1	2.2	3.9
	Titik 2	0.45	0.55	0.65	1.18
	Titik 3	0.45	0.55	0.7	1
	Rata-rata	0.52	0.73	1.18	2.03
2	Segmen 2				
	Titik 1	0.5	0.7	0.9	2.2
	Titik 2	0.35	0.4	0.52	0.85
	Titik 3	0.35	0.4	0.54	0.8
	Rata-rata	0.40	0.50	0.65	1.28
3	Segmen 3				
	Titik 1	0.53	0.65	0.82	1.6
	Titik 2	0.5	0.61	0.8	1.6
	Titik 3	0.4	0.56	0.62	1.1
	Rata-rata	0.48	0.61	0.75	1.43

Hasil pengolahan data analisis saringan berupa grafik hubungan antara diameter butir (mm) dan persentase lolos saringan diplot untuk mendapatkan nilai d35, d50, d65 dan d90. Hasil analisis diameter butiran setiap segmen masing-masing ditampilkan pada Tabel 4.

3.2. Analisis Data

3.2.1 Debit Aliran

Debit rerata aliran setiap segmen diperoleh dengan mengalikan rerata kecepatan dan total luas setiap segmen. Hasil analisis debit rerata aliran ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Data Debit Rerata

Segmen	Luas (m ²)	Kecepatan (m/det)	Debit Rerata (m ³ /det)
1	2,66	0,28	0,75
2	3,91	0,25	0,96
3	3,70	0,17	0,63
Rata-rata	3,42	0,23	0,78

Tabel 5 menampilkan debit terbesar terletak pada segmen 2 yaitu 0,96 m³/det dan debit terkecil terletak pada segmen 3 yaitu 0,63 m³/det. Perbedaan hasil debit rerata karena adanya beberapa faktor yaitu bentuk penampang sungai, kedalaman aliran dan kecepatan aliran sungai.

3.2.2 Analisis Angkutan Sedimen Dasar

a) Debit rerata pengukuran

Nilai debit menggunakan hasil pengukuran sesaat di lapangan yang terdapat pada Tabel 5.

1) Persamaan Meyer-Peter dan Muller (MPM)

Data yang diketahui:

Debit (Q) = 0,75 m³/det

Luas (A) = 2,66 m²

Lebar Dasar = 14 m

Kecepatan rerata (V) = 0,28 m/det

Kemiringan garis energi (S) = 0,0018 m (peta topografi)

Radius hidrolik (R) = 0,18 m (R = h, bila h (kedalaman saluran) < 5% x b (lebar saluran))

Ukuran butiran d35 = 0,52 mm; d50 = 0,73 mm; d65 = 1,18 mm; d90 = 2,03 mm.

Berat volume (γ) = 1,32 kg/m³

Angkutan sedimen dasar

Rumus Stickler

$$V = k R^{2/3} S^{1/2}$$

$$0,281 = k \times 0,32 \times 0,04$$

$$k = 20,78$$

Koefisien kekasaran dasar alur sungai k'

$$k' = \left(\frac{26}{d_{90}^{1/5}} \right) = \left(\frac{26}{(2,03 \times 10^{-3})^{1/5}} \right) = 22,57$$

Ripple Factor

$$\mu = \left(\frac{k}{k'} \right)^{3/2} = \left(\frac{20,78}{22,57} \right)^{3/2} = 0,88$$

Laju muatan sedimen dasar menggunakan Persamaan 3.

$$\gamma R_h \left(\frac{k}{k'} \right)^{3/2} S = 0,047 (\gamma_s - \gamma) d_m + 0,25 \left(\frac{\gamma}{g} \right)^{1/3} (qb)^{2/3}$$

$$1 \times 0,18 \times 0,18 \times 0,88 \times 0,0018 = 0,047 \times 0,32 \times 0,00073 + 0,25 \times 0,467 \times (qb)^{2/3}$$

$$qb = 0,0000065 \text{ kg/m.det}$$

$$Qb = qb W$$

$$= 0,0000065 \times 14$$

$$= 0,000091 \text{ kg/det}$$

Hasil angkutan sedimen dasar pada segmen 1, 2 dan 3 ditampilkan dalam Tabel 6.

Tabel 6. Meyer-Peter dan Muller debit pengukuran

Segmen	Q (m ³ /det)	V (m/det)	k	k'	μ	qb (ton/mdet)	Qb (ton/hari)	Qb (ton/thn)
1	0.75	0.28	20.77	22.57	0.88	0.000006	0.0078	2.85
2	0.96	0.25	10.68	24.73	0.28	0.000016	0.0126	4.59
3	0.63	0.17	8.36	24.19	0.20	0.000004	0.0031	1.14
Rata-rata							0.0078	2.86

Segmen 1 nilai angkutan sedimen dasar sebesar 2,85 ton/tahun, kemudian naik sebesar 4,59 ton/tahun di segmen 2 hingga akhirnya turun drastis di angka 1,12 ton/tahun pada segmen 3. Jika direratakan, maka nilai angkutan sedimen dasar pada Sungai Alopohu sebesar 2,86 ton/tahun dengan menggunakan persamaan Meyer-Peter dan Muller.

2) Persamaan Einstein

$$\psi = \frac{\Delta d_{35}}{\mu R S}$$

$$\psi = \frac{1,32 - 1}{1} \cdot \frac{0,52 \times 10^{-3}}{0,88 \cdot 0,18 \cdot 0,0018} = 0,58 \text{ (tanpa satuan)}$$

Berdasarkan Grafik Einstein untuk $\psi = 0,58$ diperoleh intensitas sedimen dasar $\phi = 5,2$. Sehingga angkutan sedimen dasar dapat dihitung sebagai berikut.

$$\phi = \frac{q_B}{\rho_s \Delta^2 (g d_{35})^2}, \text{ maka diperoleh}$$

$$5,2 = \frac{q_B}{1,32 \times 0,57 \times 0,0004}$$

$$q_b = 0,0014 \text{ kg/m.det}$$

$$Q_b = 0,0198 \text{ kg/det atau } 0,00002 \text{ ton/det}$$

Hasil angkutan sedimen dasar pada segmen 1, 2 dan 3 ditampilkan dalam Tabel 7.

Tabel 7. Einstein debit pengukuran

Segmen	Q (m ³ /det)	V (m/det)	k	k'	μ	Ψ	ϕ	qb	Qb (ton/det)
1	0.75	0.28	20.78	22.57	0.88	0.58	5	0.0014	0.000020
2	0.96	0.25	10.68	24.73	0.28	0.58	10	0.0017	0.000016
3	0.63	0.17	8.36	24.19	0.20	0.29	10	0.0026	0.000024
Rata-rata									0.000020

Nilai angkutan sedimen dari analisis menggunakan persamaan Einstein menampilkan angkutan sedimen yang menurun setiap segmennya. Pada segmen 1 nilai angkutan sedimen sebesar 624,59 ton/tahun, kemudian pada segmen 2 mengalami penurunan sebesar 493,13 ton/tahun dan pada segmen 3 nilai angkutan sedimen juga mengalami penurunan hingga 745,29 ton/det. Nilai rerata angkutan sedimen yang didapatkan berdasarkan persamaan Einstein sebesar 621,00 ton/tahun.

3) Persamaan Frijlink

$$\frac{\Delta d_{50}}{\mu_{RS}} = \frac{0,32 \times 0,73 \times 10^{-3}}{0,88 \times 0,18 \times 0,0018} = 0,82$$

Selanjutnya diplot ke Grafik Frijlink, sehingga diperoleh

$$\frac{q_b}{d_{50} \sqrt{g \mu_{RS}}} = 4$$

maka,

$$q_b = 4 \times d_{50} \times \sqrt{g \mu_{RS}} = 0,000155 \text{ kg/m.det}$$

$$Q_b = 0,0022 \text{ kg/det}$$

Hasil angkutan sedimen dasar pada segmen 1, 2 dan 3 ditampilkan dalam Tabel 8.

Tabel 8. Frijlink Debit Pengukuran

Segmen	Q (m ³ /det)	V (m/det)	k	k'	μ	$\frac{\Delta d_{50}}{\mu_{RS}}$	qb	Qb (ton/hr)	Qb (ton/thn)
1	0.75	0.28	20.78	22.57	0.88	0.82	4.0	0.0001550	1.87168.29
2	0.96	0.25	10.68	24.73	0.28	0.21	4.5	0.0001890	1.47053.67
3	0.63	0.17	8.36	24.19	0.20	0.37	3.2	0.0001480	1.15242.06
Rata-rata									0.149854.67

Nilai angkutan sedimen dasar pada segmen 1, 2 dan 3 masing-masing adalah 68,29 ton/tahun; 53,67 ton/tahun dan 42,06 ton/tahun. Jika direratakan, nilai angkutan sedimen dasar menggunakan persamaan Frijlink sebesar 54,67 ton/tahun.

b) Debit Maksimum dari Data Rating Curve

Debit yang digunakan pada analisis ini adalah debit maksimum yang terjadi pada Sungai Alopohu berdasarkan data rating curve yang ada. Debit maksimum sebesar 32 m³/det dengan kedalaman 2,3 m, didapat total luas penampang basah aliran sebesar 34,14 m². Kecepatan pada debit maksimum diperoleh dari hasil pembagian debit maksimum dengan luas total, sehingga kecepatan rerata adalah 0,94 m/det. Hasil angkutan sedimen dasar berdasarkan debit maksimum ditampilkan dalam Tabel 9-11.

Tabel 9. Meyer-Peter dan Muller debit maksimum

Segmen	Q (m ³ /det)	V (m/det)	k	k'	μ	qb	Qb (ton/det)	Qb (ton/tahun)
1	32	0.94	12.68	23.72	0.39	0.03	0.44	14029879.98

Tabel 10. Einstein debit maksimum

Segmen	Q (m ³ /det)	V (m/det)	k	k'	μ	Ψ	ϕ	qb	Qb (ton/det)	Qb (ton/tahun)
1	32	0.94	12.68	23.72	0.39	0.09	10	0.0023	0.03	1030347.24

Tabel 11. Frijlink debit maksimum

Segmen	Q (m ³ /det)	V (m/det)	k	k'	μ	$\frac{\Delta d_{50}}{\mu_{RS}}$	qb	Qb (ton/det)	Qb (ton/thn)
1	32	0.94	12.68	23.72	0.39	0.12	5.0	0.0004	0.0054170558.74

Berdasarkan ketiga tabel, dapat diambil kesimpulan bahwa setiap persamaan masing-masing memiliki koefisien yang berbeda dan dengan penyelesaian yang berbeda sesuai dengan prinsip persamaan. Meyer-Peter dan Muller dalam penyelesaiannya hanya berupa analisis, berbeda dengan Einstein dan Frijlink selain secara analisis juga bisa menggunakan grafik dalam menyelesaikan persamaan tersebut. Distribusi ukuran butiran yang digunakan oleh masing-masing persamaan juga berbeda. Meyer-Peter dan Muller dan Frijlink menggunakan d50 dalam persamaannya, sedangkan Einstein menggunakan distribusi ukuran butiran d35.

4. Kesimpulan

Besar angkutan sedimen dasar (*bed load*) di hilir Sungai Alopohu berdasarkan data debit pengukuran dengan formula Meyer-Peter dan Muller adalah 2,86 ton/tahun; formula Einstein sebesar 621 ton/tahun serta formula Frijlink sebesar 54,67 ton/tahun. Persentase perbedaan hasil analisis sedimen dasar berdasarkan data debit maksimum dengan hasil sedimen dasar pada penelitian sebelumnya, untuk formula Meyer-Peter dan Muller adalah 1,86%; formula Einstein sebesar 1,36%; serta formula Frijlink sebesar 0,23%. Perbedaan besaran muatan untuk setiap rumus empiris disebabkan oleh parameter setiap rumus empiris untuk rumus Meyer-Peter dan Muller, Einstein dan Frijlink.

Daftar Pustaka

- [1] S.L. Mahmud, N. Achmad, and H.S. Panigoro, "Revitalisasi Danau Limboto dengan Pengerukan Endapan di Danau: Pemodelan, Analisis, dan Simulasinya", *Jambura Jurnal Biomath*, vol. 1, no. 1, p. 31, 2020.
- [2] I. Umar, A. Marsoyo, and B. Setiawan, "Analisis Perubahan Penggunaan Lahan Sekitar Danau Limboto di Kabupaten Gorontalo", *Tata Kota dan Daerah*, vol. 10, no. 2, p. 77, 2018.
- [3] I.S. Yudha, "Detection of Changes in Water Surface Area in Limboto Lake Using Landsat Data From 1990 to 2020", *IOP Publishing*, vol. 2023, p.1, 2023.
- [4] A. Suwanto, T.N. Harahap, H. Manurung, W.C. Rustadi, S.R. Nasution, and I.N.N. Suryadiputra, *Profil 15 Danau Prioritas Nasional*, Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup, 2011.
- [5] S. Karim, P.J.C. Franklin, and J.A.R. Sondakh, "Utilization of Land Around Lake Limboto, Gorontalo Regency", *Jurnal Spasial*, vol. 9, no. 1, p. 124, 2022.
- [6] D.H. Mano, *Pendangkalan Danau Limboto 46,6 Cm Per Tahun*, Gorontalo: BLHRD, 2016.
- [7] M. Jahja, Y.I. Arifin, N.A. Gafur, F. Masulili, A.P.M., Kusuma, and M. Sakakibara, "Performances of Erosion Control Blanket Made From Palm Fiber On Reducing Erosion in the Slopes of Lake Limboto Basin", *E3S Web Conference*, vol. 400, p. 1, 2023.
- [8] M.A. Rahman, U. Lasminto, B. Sarwono, and Edijatno, "Studi Pengaruh kapasitas Tampung Danau Limboto terhadap aliran sungai Limboto Gorontalo", *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil XI*, p. 1, 2015.
- [9] A. Alfianto, .Cecilia S, and B. Ridwan, "Pemodelan Potensi Erosi dan Sedimentasi Hulu Danau Limboto dengan WATEM/SEDEM", *Jurnal Teknik Hidraulik*, vol. 11, no. 2, p. 67, 2020.
- [10] F. Lihawa, *Daerah Aliran Sungai Alo*, Yogyakarta: Deepublish, 2017.
- [11] Y. Mosi, N. Warow, M. Usman, I.C. Bahuwa, N. Rosalia, and Z.S. Kadir, "Analisis Erosi dan Sedimentasi di Sub Das Alo-Pohu Kesatuan Pengelolaan Hutan Vi Gorontalo", *Jurnal Sains, Teknologi dan Lingkungan*, vol. 10, no. 2, p. 321, 2024.
- [12] R. Haluti, U. Andawayanti, and H. Siswoyo, "Effectiveness Analysis of Sediment Control Building in the Alopohu River Flow", *IrjaesCom*, vol. 7, no. 3, p. 234, 2022.
- [13] A. Kuriqi, G. Koçileri, and M. Ardiçlioğlu, "Potential of Meyer-Peter and Müller Approach for Estimation of Bed-Load Sediment Transport under Different Hydraulic Regimes", *Modeling Earth and System Environment*, vol. 6, no. 1, p. 129, 2020.
- [14] S.J. Benavides, E. Deal, M. Rushlow, V.G. Venditti, Q. Zhang, and K. Kamrin, "The Impact of Intermittency on Bed Load Sediment Transport", *Geophysic Research Letter*, vol. 49, no. 5, p. 1, 2022.
- [15] Nenny, "Karakteristik Sedimen dan Pola Transportasi di Sungai Berdasarkan Variasi Debit Aliran", *Journal of Innovation Research and Knowledge*, vol. 4, no. 1, p. 53, 2024.
- [16] M. Maqdan, E. Yogafanny, A. Sungkowo, M.A. Setiawan, and J. Sartohadi, "Analisis Karakteristik Sedimen Melayang dan Sedimen Dasar pada Sungai Bompon untuk Pengelolaan DAS Terpadu di Sub DAS Bompon, Kabupaten Magelang, Jawa Tengah", *Jurnal Mineral, Energi, dan Lingkungan*, vol. 3, no. 1, p. 26, 2019.
- [17] Saifurridzal, E. Hidayah, G. Halik, W.Y. Widiarti, and S.I.L. Prasojo, "Pengukuran Debit di Saluran Irigasi (Studi Lokasi Daerah Irigasi Kabupaten Jember)", *PEKAT Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, vol. 2, no. 2, p. 59, 2023.
- [18] D. Weg, W. Van, and G.A.D. Tel, *Coastal Sediment Transport*, Newyork: Willey and Son, 1976.
- [19] W.R. White, H. Milli, A.D. Crabbe, "Sediment Transport: An Appraisal of Available Methods", *Journal of Water*, vol. 1, p. 1., 1973.

This page is intentionally left blank