

EVALUASI ANGKUTAN SEDIMEN MELAYANG PADA SUNGAI BONE DI PROVINSI GORONTALO

*Wardah Putri¹, Komang Arya Utama¹ and Rawiyah Husnan¹

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Gorontalo

*Corresponding Author, Received: Jan. 2025, Revised: Mar. 2025, Accepted: Jul. 2025

ABSTRAK: Sungai Bone mengalami pendangkalan di bagian muaranya. Tingginya angkutan sedimen melayang pada Sungai Bone terlihat dari kondisi fisik air yang keruh di sepanjang tahun baik musim kemarau maupun penghujan yang disebabkan oleh banyak faktor diantaranya erosi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi besar laju angkutan sedimen melayang pada daerah hulu, tengah, dan hilir Sungai Bone. Metode penelitian yang dilakukan yaitu dengan membandingkan pengukuran sesaat dan tiga Metode Empiris berupa Metode Lane and Kalinske, Metode Einstein dan Metode Chang Simon and Richardson. Pengambilan sampel yang dilakukan di lapangan berupa sampel sedimen melayang, sampel sedimen dasar dan pengukuran hidrometri pada sungai. Sampel diuji di Laboratorium untuk mendapatkan parameter yang diperlukan pada formulasi yang dipilih. Hasil perhitungan laju angkutan menggunakan Metode Sesaat berkisar antara 925,40-1.179,81 ton/tahun, menggunakan metode Lane and Kalinske berkisar antara 2.180,51- 3.492,05 ton/tahun, menggunakan Metode Einstein berkisar antara 22,23-33,32 ton/tahun, dan menggunakan Metode Chang Simon and Richardson berkisar antara 45,12-68,35 ton/tahun. Persentase beda perbandingan hasil perhitungan antara Metode Sesaat terhadap Metode Empiris sebesar 152,55% lebih besar untuk Sesaat-Lane and Kalinske, 97,52% lebih kecil untuk Sesaat-Einstein dan 94,99% lebih kecil untuk Sesaat-Chang Simon and Richardson.

Kata Kunci: Angkutan Sedimen Melayang, Metode Empiris, Pengukuran Sesaat.

1. PENDAHULUAN

Sungai secara alami memiliki dua fungsi utama yaitu mengalirkan air dan mengangkat sedimen hasil erosi pada Daerah Aliran Sungai (DAS) dan alurnya. Kedua fungsi ini terjadi bersamaan dan saling mempengaruhi [3]. Proses pengaliran air pada sungai akan menyebabkan terjadi proses pengikisan tanah atau erosi. Erosi adalah proses perpindahan bagian-bagian tanah dari suatu tempat ke tempat yang lain.

Erosi berasal dari dua sumber utama yaitu erosi alamiah dan erosi akibat aktivitas manusia. Erosi alamiah terjadi karena proses pembentukan tanah dan secara alami mempertahankan keseimbangan tanah [2]. Erosi memicu terjadinya sedimentasi yaitu suatu proses pengendapan material. Sedimentasi atau pengendapan sejumlah material pada sungai merupakan proses alamiah yang tidak bisa dihindarkan pada sungai dan bersifat kontinue [8]. Umumnya sedimentasi disebabkan oleh dua faktor utama yaitu air dan angin [12]. Pengendapan akibat sedimentasi mengakibatkan pendangkalan yang pengurangan efektivitas volume tampungan sungai [10].

Sedimentasi terjadi akibat ketidakseimbangan transpor sedimen yang terjadi di sungai tersebut. Ketidakseimbangan ini dalam jangka waktu yang panjang dapat menyebabkan degradasi dasar saluran di daerah hulu dan aggradasi dasar saluran di daerah hilir, sehingga berdampak pada pemanfaatan sungai yang tidak sesuai dengan fungsi yang

seharusnya [17].

Sungai Bone adalah sungai yang mengalir di Kabupaten Bone Bolango dan Kota Gorontalo. Sungai ini merupakan salah satu sungai terbesar di Provinsi Gorontalo. Sungai Bone berhulu di Kecamatan Pinogu, dan mengalir melalui beberapa kecamatan di Kabupaten Bone Bolango sebelum berakhir di muara yang berada di Kota Gorontalo yang juga merupakan area pelabuhan tempat kapal-kapal niaga bersandar untuk kegiatan bongkar muat [1].

Topografi wilayah Kota Gorontalo berupa wilayah dataran rendah yang dilalui oleh tiga sungai (Sungai Bone, Bolango, dan Tamalate) yang bermuara di Teluk Tomini, serta dua perbukitan terjal di bagian selatan [9]. Teluk Gorontalo merupakan lalu lintas pelayaran dan sumber kehidupan bagi penduduk disekitarnya. Aliran air hasil tangkapan DAS Limboto-Bolango-Bone akan mengalir menuju Kota Gorontalo. Hilir kedua sungai tersebut yaitu Sungai Bone dan Bolango bertemu pada daerah muaranya yaitu di Teluk Gorontalo [1].

Kisaran sedimentasi Sungai Bone berada pada tingkat cukup tinggi berkisar antara 871,32 – 19.670,98 g/m/hari yang berpotensi tinggi menyebabkan terjadinya perubahan elevasi sungai dan area muaranya [11].

Sungai Bone memiliki satu masalah utama yang terjadi sepanjang tahun yaitu kekeruhan air pada aliran sungai, baik pada musim kemarau maupun musim penghujan. Kekeruhan ini

menandakan besarnya angkutan sedimen yang terbawa dan mengendap pada dasar sungai akibat erosi di sepanjang sungai.

Sedimentasi pada Sungai Bone terjadi akibat beberapa faktor seperti adanya aktivitas penambangan pasir ilegal dan pembukaan lahan pertanian pada daerah hulu yang dilakukan tanpa memperhatikan kaidah-kaidah pengelolaan daerah aliran sungai. Sedimentasi memberikan dampak pendangkalan pada sungai. Akibatnya terjadi penurunan nilai fungsi dan manfaat sungai yang berdampak pada turunnya efisiensi dari daya tampung sungai itu sendiri.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi debit angkutan sedimen melayang yang terjadi setiap tahunnya pada Sungai Bone dan membandingkan hasil angkutan yang dianalisis dengan pengukuran langsung terhadap beberapa metode empiris yang digunakan.

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1 Sungai

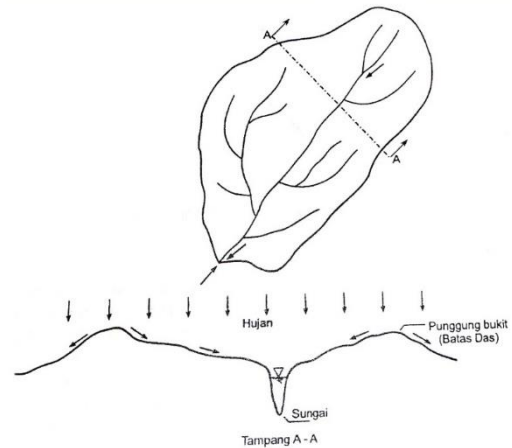
Sungai merupakan jaringan alur-alur pada permukaan bumi yang terbentuk secara alamiah, mulai dari bentuk kecil di bagian hulu sampai besar dibagian hilir. Aliran sungai merupakan sumber air yang paling dominan untuk memenuhi kebutuhan hidup manusia [12]. Suatu alur yang panjang di atas permukaan bumi tempat mengalirnya air yang berasal dari hujan disebut alur sungai. Bagian yang senantiasa tersentuh aliran air ini disebut alur sungai dan perpaduan antara alur sungai dengan aliran air di dalamnya disebut sungai [8].

2.2 Daerah Aliran Sungai (DAS)

Daerah aliran sungai (DAS) adalah daerah yang dibatasi oleh punggung-punggungan gunung/pegunungan di mana air hujan yang jatuh di daerah tersebut akan mengalir menuju sungai utama pada suatu titik/stasiun yang ditinjau. Luas DAS diperkirakan dengan mengukur daerah itu pada peta topografi. Luas DAS sangat berpengaruh terhadap debit sungai. Pada umum-nya semakin besar DAS semakin besar jumlah limpasan permukaan sehingga semakin besar pula aliran permukaan atau debit sungai [15].

DAS merupakan suatu ekosistem dimana di dalamnya terjadi suatu proses interaksi antara faktor-faktor biotik, non biotik, dan manusia. Sebagai suatu ekosistem, maka setiap ada masukan (*input*) ke dalamnya, proses yang terjadi dan berlangsung di dalamnya dapat dievaluasi berdasarkan keluaran (*output*) dari ekosistem tersebut. Komponen masukan dalam ekosistem DAS adalah curah hujan, sedangkan keluaran terdiri dari debit air dan muatan sedimen. Komponen-

komponen DAS yang berupa vegetasi, tanah, dan saluran/sungai dalam hal ini bertindak sebagai processor [16]. Daerah aliran sungai (DAS) ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Daerah aliran sungai (Triatmodjo, 2008)

2.3 Debit Aliran Sungai

Debit aliran sungai adalah volume air yang mengalir melewati penampang sungai pada luasan dan kecepatan tertentu yang saling mempengaruhi terutama curah hujan dan sifat fisik. Data debit atau aliran sungai merupakan informasi yang paling penting bagi pengelolaan sumber daya air. Debit sungai diperoleh setelah mengukur kecepatan air dengan alat pengukur atau pelampung untuk mengetahui data kecepatan aliran sungai ditunjukkan pada Persamaan 1 [2].

$$Q = \Sigma A \cdot V \quad (1)$$

dengan Q = debit aliran sungai (m^3/d), A = luasan dari setiap pias (m^2) dan V = kecepatan rerata di setiap pias (m/d)

2.4 Sedimentasi

Sedimen merupakan hasil proses erosi permukaan, erosi parit dan jenis erosi tanah lainnya. Sedimen biasanya mengendap di bawah kaki bukit, di daerah genangan banjir, di saluran air, sungai, waduk. Sedimentasi dapat didefinisikan sebagai pengangkutan, melayangnya (*suspensi*) atau mengendapnya material fragmental oleh air ke dasar sungai [14].

2.4.1 Mekanisme Angkutan Sedimen

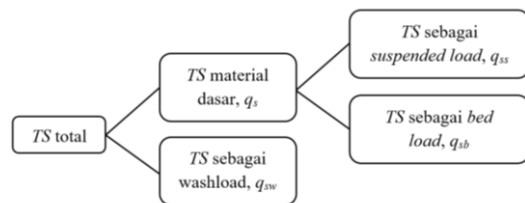
Proses pengangkutan sedimen (*sediment transport*) dapat diuraikan meliputi proses-proses berikut [6]:

- Pukulan air hujan (*rainfall detachment*) terhadap bahan sedimen yang terdapat diatas tanah sebagai hasil dari erosi percikan (*splash erosion*) dapat menggerakkan partikel-partikel

- tanah tersebut dan akan terangkut bersama-sama limpasan permukaan (*overland flow*).
- Limpasan permukaan (*overland flow*) juga mengangkat bahan sedimen yang terdapat di permukaan tanah, selanjutnya dihanyutkan masuk kedalam alur-alur (rilis), dan seterusnya masuk ke dalam selokan dan akhirnya ke sungai.
 - Pengendapan sedimen, terjadi pada saat kecepatan aliran yang dapat mengangkat dan mengangkut bahan sedimen mencapai kecepatan pengendap yang dipengaruhi oleh besarnya partikel-partikel sedimen dan kecepatan aliran.

2.4.2 Pengelompokan Pengangkutan Sedimen

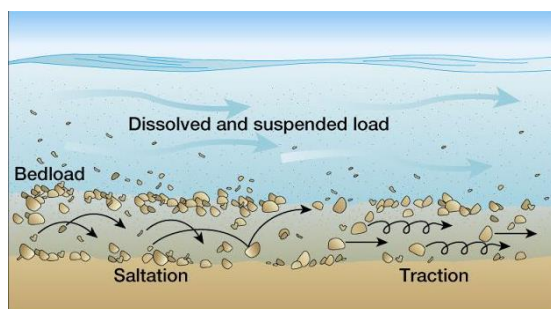
Pengelompokan pengangkutan sedimen dapat dibagi menjadi tiga yaitu: sebagai muatan melayang (*suspended load*), muatan bilas (*wash load*) dan muatan dasar (*bed load*). Angkutan sedimen dasar bergerak di dasar secara menggelinding (*rolling*), bergeser (*sliding*), dan meloncat (*jumping*) pada dasar sungai [4]. Pengelompokan cara pengangkutan sedimen ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Pengelompokan pengangkutan sedimen (Harijanto, et al., 2021)

2.4.3 Sedimen Melayang

Sedimen melayang (*suspended load*) adalah sedimen yang melayang-layang di dalam air, karena turbulensi aliran. Jumlah sedimen yang melayang sangat berhubungan erat dengan konsentrasi sedimen melayang yang disebut dengan “C” [6]. Muatan layang (*Suspended Load*) memiliki ukuran partikel lebih kecil dari 0,1 mm yang bergerak dalam aliran yang cenderung terus menerus melayang bersama aliran [2]. Pergerakan angkutan sedimen pada sungai ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Pergerakan angkutan sedimen (Asdak, C., 2010)

3. METODE PENELITIAN

3.1 Persiapan Penelitian

Penelitian diawali dengan melakukan pengkajian teori, studi mengenai metode pengumpulan data dan survei pada lokasi yang akan menjadi titik pengambilan sampel, tujuannya agar tidak terjadi kesalahan pada saat pengumpulan data primer maupun sekunder yang dibutuhkan pada analisis angkutan sedimen.

3.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data primer berupa pengukuran hidrometri sungai yang meliputi pengukuran lebar sungai, kedalaman aliran dan kecepatan aliran, serta pengambilan sampel sedimen melayang dan sedimen dasar. Pengukuran lebar sungai dilakukan menggunakan alat ukur *waterpass* sedangkan kedalaman aliran menggunakan mistar duga. Kecepatan aliran diukur secara langsung pada permukaan aliran menggunakan bantuan pelampung. Pengukuran kecepatan aliran pada permukaan untuk mendapatkan kecepatan rerata pada vertikal, nilai terukur dikalikan dengan koefisien 0,85 [2]. Kecepatan aliran dihitung dengan Persamaan 2.

$$V = C \frac{L}{T} \quad (2)$$

Pengambilan sampel sedimen melayang dilakukan dengan 7 kali ulangan pada tiap lokasi. Posisi pengambilan sampel disesuaikan dengan posisi pada pengukuran kecepatan aliran, sedangkan sampel sedimen dasar diambil dengan mengeruk pada bibir sungai sebanyak ± 2 kg.

3.3 Pengujian Sampel

Uji konsentrasi sedimen melayang dilakukan dengan pengovenan sampel basah sedimen melayang selama ± 48 jam atau sampai hanya tersisa butir sedimen melayangnya saja. Konsentrasi sedimen melayang dihitung dengan Persamaan 3 untuk menghitung, C_s (mg/l) [2].

$$C_s = \frac{\text{Berat kering sedimen}}{\text{Volume air pada botol sampel}} \quad (3)$$

Sedangkan pengujian pada sampel sedimen dasar berupa pengujian hidrometer menggunakan pedoman SNI 3423 2008. Pengujian bertujuan untuk mendapatkan distribusi ukuran butir d_{50} dan d_{65} yang menjadi parameter pada formulasi empiris yang telah dipilih.

3.4 Pengolahan dan Analisis Data

Terdapat beberapa persamaan empiris yang umumnya sering digunakan untuk memperkirakan angkutan sedimen melayang yaitu [6]:

3.4.1 Persamaan Lane and Kalinske

Lane and Kalinske, mengasumsikan bahwa muatan sedimen melayang dapat dihitung dengan Persamaan 4.

$$q_{sw} = q \cdot C_a \cdot P_L \cdot \exp\left(\frac{15 \cdot \omega \cdot a}{U^* \cdot D}\right) \quad (4)$$

dengan q_{sw} = berat sedimen per satuan waktu dan lebar (kg/s/m), q = debit aliran per satuan lebar (m²/s), P_L = koefisien (Isma, et al., 2020), C_a = konsentrasi sedimen melayang (mg/l), U^* = kecepatan geser (m/s), ditunjukkan pada Persamaan 5 dan ω = kecepatan jatuh sesuai d_{50} , ditunjukkan pada Persamaan 6 (m/s), $a = d \times 0,05$, D = kedalaman aliran (m).

$$U^* = \sqrt{g \cdot h \cdot S_o} \quad (5)$$

$$\omega = \left[\frac{g \cdot d^2}{18 \cdot \nu} \right] \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} \right) \quad (6)$$

dengan U^* = kecepatan geser (m/s), h = kedalaman sungai rata-rata (m), S_o = kemiringan dasar saluran (%), ω = kecepatan jatuh sedimen (m/s), ν = koef kekentalan kinematik 1×10^{-6} (Stokes law), g = percepatan gravitasi bumi (9,81 m/s²), d = diameter sedimen lolos saringan 50% (m), γ_s = berat jenis sedimen dan γ = berat jenis air (62,3 lb/ft³ atau 1000 kg/m³) (U.S. Bureau of Reclamation 1987).

3.4.2 Persamaan Einstein

Einstein, mengasumsikan bahwa muatan sedimen melayang dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 7:

$$q_{sw} = 11,6 \cdot U' \cdot C_a \cdot a \left[\left(2,303 \cdot \log \frac{30,2 \cdot D}{\Delta} \right) I_1 + I_2 \right] \quad (7)$$

dengan q_{sw} = berat angkutan sedimen (ton/hari), $U' = U^*$ = kecepatan geser (m/s) ditunjukkan pada Persamaan 5, C_a = konsentrasi sedimen melayang (mg/l), $a = 2x d_{65}$, $\Delta = d_{65}/x$ (d_{65} = ukuran butir yang 65% lolos saringan), x = koefisien (Isma, et al., 2020) dengan menghubungkan Persamaan 8, D = kedalaman aliran (m), I = numerik terintegrasi (Isma, et al., 2020) dengan menghubungkan Persamaan 9 dan 10, dan ω = kecepatan jatuh sesuai d_{50} (m/s), ditunjukkan pada Persamaan 6.

$$\frac{k_s}{\delta'} = \frac{U' \cdot d_{65}}{11,6 \cdot \nu} \quad (8)$$

$$A = \frac{2d}{D} \quad (9)$$

$$Z = \frac{\omega}{0,4 \cdot U^*} \quad (10)$$

3.4.3 Persamaan Chang Simon and Richardson

Chang, Simons and Richardson, mengasumsikan bahwa muatan melayang dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 11:

$$q_{sw} = \gamma \cdot D \cdot C_a \cdot \left(V \cdot I_1 - \frac{2U^*}{k} I_2 \right) \quad (11)$$

dengan q_{sw} = berat angkutan sedimen (ton/hari), γ = berat jenis air, D = kedalaman aliran (m), C_a = konsentrasi sedimen melayang (mg/l), V = rata-rata

kecepatan aliran (m/s), $U' = U^*$ = kecepatan geser (m/s) ditunjukkan pada Persamaan 5, I = numerik terintegrasi (Isma, et al., 2020) dengan menghubungkan Persamaan 12 dan 13.

$$\xi a = \frac{a}{D} \quad (12)$$

$$Z_2 = \frac{2 \cdot \omega}{\beta \cdot U^* k} \quad (13)$$

dengan $a = D \times 0,05$, $\beta = 1$ (Einstein 1950) dan k = konstanta Prandtl-Von Karman (0,4).

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Deskripsi Lokasi Pengambilan Sampel

Aliran Sungai Bone mengalir melalui beberapa desa di Kabupaten Bone Bolango sampai pada wilayah hilirnya di Kota Gorontalo. Tinggi muka air hasil pengukuran berkisar 1,30-1,35 m dengan lebar berkisar 51,24-64,58 m dan debit berkisar 51,66-54,52 m³/d. Berdasarkan hasil pengamatan di lapangan Sungai Bone memiliki kondisi fisik air yang sangat keruh di sepanjang alirannya, hal ini menandakan tingginya angkutan sedimen yang terbawa pada sungai tersebut. Sedimentasi akibat erosi mengakibatkan terbentuknya delta di beberapa titik pada sungai. Meskipun demikian Sungai Bone tetap dimanfaatkan sebagai sumber air irigasi untuk lahan pertanian yang ada di sekitarnya.

4.2 Pengukuran Hidrometri Sungai

Pengukuran dilakukan pada saat debit air normal, pengukuran berupa kecepatan aliran (V) menggunakan metode pelampung permukaan, kedalaman aliran (D) menggunakan mistar duga dan lebar sungai (B) dengan alat ukur *waterpass*. Hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil pengukuran hidrometri

Lokasi	B (m)	D (m)	V (m/s)
Hulu	51,24	1,30	0,85
Tengah	49,13	0,98	1,21
Hilir	64,58	1,35	0,68

Debit aliran dihitung dengan Persamaan 1, luas penampang sungai (A) dihitung dengan membagi sungai menjadi sejumlah pias yang diukur kedalaman dan kecepatan alirannya. Kecepatan aliran yang digunakan adalah kecepatan aliran terkoreksi menggunakan Persamaan 2. Hasil perhitungan debit ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 2. Hasil perhitungan debit

Lokasi	Luas, A (m ²)	Debit, Q _w (m ³ /s)
Hulu	60,63	51,66
Tengah	44,14	53,24
Hilir	80,58	54,52

4.3 Pengujian Laboratorium

Pengujian laboratorium berupa pengujian berat jenis (GS) sebagai salah satu parameter yang digunakan pada formulasi empiris, pengujian hidrometer untuk mengetahui diameter ukuran butir d_{50} dan d_{65} , serta uji konsentrasi sedimen melayang yang dihitung dengan Persamaan 3 pada tiga lokasi pengambilan sampel yaitu Tulabolo (hulu), Alale (tengah) dan Talumolo (hilir) ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil pengujian laboratorium

Lokasi	GS	Ukuran butir (mm)		Konsentrasi sedimen melayang (mg/l)
		d_{50}	d_{65}	
Hulu	2,65	0,08	0,12	568,06
Tengah	2,75	0,11	0,13	657,54
Hilir	2,65	0,07	0,08	686,24

Pengujian berat jenis (GS) menggunakan sampel sedimen dasar yang diambil dengan cara mengeruk pada pinggiran sungai di lokasi pengambilan sampel

Konsentrasi sedimen melayang pada Sungai Bone dikategorikan sangat jelek berdasarkan klasifikasi standar indeks resin air pada konsentrasi sedimen melayang yang dikelompokkan ke dalam 5 kategori yakni: sangat baik (0 mg/l), baik (0-100 mg/l), sedang (>100-250 mg/l), jelek (>250 – 500 mg/l) dan sangat jelek (>500 mg/l) [7].

4.4 Rekapitulasi Data Hasil Pengukuran dan Pengujian Sampel Sedimen

Data hasil pengukuran dan pengujian sampel sedimen melayang pada ketiga lokasi pengambilan sampel yaitu pada Tulabolo (hulu), Alale (Tengah) dan Talumolo (Hilir) ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi data hasil pengukuran dan pengujian sampel

No.	Parameter	Satuan	Lokasi		
			Hulu	Tengah	Hilir
1.	Debit, Q	m ³ /d	51,66	53,24	54,52
2.	Luas, A	m ²	60,63	44,14	80,58
3.	Lebar sungai, B	m	51,24	49,13	64,58
4.	Kecepatan, V	m/d	0,85	1,21	0,68
5.	Kedalaman aliran, D	m	1,30	0,98	1,35
6.	Jari-jari hidrolik, R $R=h$ jika $h<5\%B$	m	1,30	0,98	1,35
7.	Kemiringan saluran (S_0) menggunakan Pers. Manning $V = \frac{R^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n}$	%	0,0461	0,241	0,0279
8.	Koef Manning, n		0,03	0,04	0,03
9.	Berat jenis air, γ	kg/m ³	1000	1000	1000
10.	Berat jenis sedimen, γ_s	kg/m ³	2652	2754	2650
11.	Percepatan gravitasi, g	m/d	9,81	9,81	9,81
12.	Viskositas kinematis, ν	m ² /d	0,000001	0,000001	0,000001
13.	d_{50}	m	0,00008	0,00011	0,00007
14.	d_{65}	m	0,00012	0,00013	0,00008
15.	C_a	gr/l	0,568	0,658	0,686
16.	Kecepatan geser, U^* (Pers.5)	m/d	0,0765	0,1521	0,0608
17.	Kecepatan jatuh, ω (Pers.6)	m/d	0,00925	0,01816	0,00708
18.	$a = D \times 0,05$ (Pers. Lane, etc)	m	0,0648	0,0489	0,0675
19.	Koefisien P_L (Gambar 4)		0,42	0,41	0,42
20.	$a = 2 \times d_{65}$ (Pers. Einstein)		0,00024	0,00026	0,00016
21.	Koefisien x		1,60	1,51	1,28
22.	$\Delta = d_{65} \cdot \text{koef x}$		0,0000750	0,0000861	0,0000625
23.	I_1 (Pers. Einstein)		100	55	175
24.	$-I_2$ (Pers. Einstein)		-180	-185	-230
25.	I_1 (Pers. Chang, etc)		0,45	0,4	0,54
26.	I_2 (Pers. Chang, etc)		0,01	0,01	0,01

4.5 Analisa angkutan sedimen melayang

4.5.1 Pengukuran Sesaat

Perhitungan laju angkutan sedimen melayang atau debit sedimen melayang dapat dihitung dengan Persamaan 14 [2] :

$$Q_s = k \cdot C_s \cdot Q_w \quad (14)$$

dengan Q_s = debit angkutan sedimen melayang (ton/hari), C_s = konsentrasi sedimen melayang (gr/l), Q_w = debit aliran sungai (m^3/d) dan k = konstanta (0,0864).

Data hasil pengukuran pada ketiga lokasi pengambilan sampel ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil pengujian laboratorium

Lokasi	C_s (gr/l)	Q_w (m^3/d)
Hulu	0,568	51,66
Tengah	0,658	53,24
Hilir	0,686	54,52

Maka angkutan sedimen dapat dihitung:

$$Q_s = k \cdot C_s \cdot Q_w$$

$$Q_s = 0,0864 \times 0,568 \times 51,66$$

$$Q_s = 2,54 \text{ ton/hari}$$

$$Q_s = 925,40 \text{ ton/tahun}$$

Rekapitulasi hasil perhitungan debit angkutan sedimen melayang menggunakan pengukuran sesaat ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Debit angkutan sedimen dengan pengukuran sesaat

Lokasi	Q_s (ton/hari)	Q_s (ton/tahun)
Hulu	2,54	925,40
Tengah	3,02	1.104,08
Hilir	3,23	1.179,81

4.5.2 Metode Lane and Kalinske

Menggunakan Persamaan 4 dan data hasil pengukuran pada Tabel 4 dapat dihitung angkutan sedimen melayang:

$$q_{sw} = Q \cdot C_a \cdot P_L \cdot \exp\left(\frac{15 \cdot \omega \cdot a}{U^* \cdot D}\right)$$

$$q_{sw} = 51,66 \cdot 1000 \cdot 0,568 \times 10^{-7} \cdot 0,42 \cdot$$

$$\exp\left(\frac{15 \cdot 0,00925 \cdot 0,0648}{0,0765 \cdot 1,30}\right)$$

$$q_{sw} = 1,35 \times 10^{-3} \text{ (kg/d)/m}$$

$$q_{sw} = (1,35 \times 10^{-3}) \cdot 51,24 = 0,069143 \text{ (kg/d)}$$

$$q_{sw} = 0,069143 \times 24 \times 60 \times 60$$

$$= 5,973,99 \text{ (kg/h)}$$

$$q_{sw} = 2180,51 \text{ (ton/tahun)}$$

Rekapitulasi hasil perhitungan angkutan sedimen melayang pada ketiga lokasi pengambilan sampel ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Debit angkutan sedimen dengan Metode Lane and Kalinske

Lokasi	Q_s (kg/hari)	Q_s (ton/tahun)
Hulu	5973,99	2.180,51
Tengah	6664,12	2.432,40
Hilir	9567,26	3.492,05

4.5.3 Metode Einstein

Menggunakan Persamaan 7 dan data hasil pengukuran pada Tabel 4 dapat dihitung angkutan sedimen melayang:

$$q_{sw} = 11,6 \cdot U^* \cdot C_a \cdot a \left[\left(2,303 \cdot \log \frac{30,2 \cdot D}{\Delta} \right) \cdot \right. \\ \left. [I1 + I2] \right]$$

$$q_{sw} = 11,6 \cdot 0,0765 \cdot 0,568 \times 10^{-7} \cdot 0,00024$$

$$\times \left[\left(2,303 \cdot \log \frac{30,2 \cdot 1,30}{0,0000750} \right) 100 + (-180) \right]$$

$$q_{sw} = 1,39 \times 10^{-5} \text{ (kg/d)/m}$$

$$q_{sw} = (1,38 \times 10^{-5}) \cdot 51,24$$

$$= 7,05 \times 10^{-4} \text{ (kg/d)}$$

$$q_{sw} = 7,05 \times 10^{-4} \times 24 \times 60 \times 60 = 60,90 \text{ kg/h}$$

$$q_{sw} = 22,23 \text{ (ton/tahun)}$$

Rekapitulasi hasil perhitungan angkutan sedimen melayang pada ketiga lokasi pengambilan sampel ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Debit angkutan sedimen dengan Metode Einstein

Lokasi	Q_s (kg/hari)	Q_s (ton/tahun)
Hulu	60,90	22,23
Tengah	66,07	24,12
Hilir	91,29	33,32

4.5.4 Metode Chang, Simon and Richardson

Menggunakan Persamaan 11 dan data hasil pengukuran pada Tabel 4 dapat dihitung angkutan sedimen melayang:

$$q_{sw} = \gamma \cdot D \cdot C_a \left(V \cdot I_1 \cdot \frac{2 \cdot U^*}{k} \cdot I_2 \right)$$

$$q_{sw} = 1000 \cdot 1,30 \cdot 0,568 \cdot 10^{-7} \cdot$$

$$\left(0,85 \cdot 0,42 \cdot \frac{2 \cdot 0,0765}{0,4} \cdot 0,01 \right)$$

$$q_{sw} = 2,79 \times 10^{-5} \text{ (kg/d)/m}$$

$$q_{sw} = (2,79 \times 10^{-5}) \cdot 51,24$$

$$= 1,43 \times 10^{-3} \text{ (kg/d)}$$

$$q_{sw} = 1,43 \times 10^{-3} \times 24 \times 60 \times 60$$

$$= 123,61 \text{ (kg/h)}$$

$$q_{sw} = 45,12 \text{ (ton/tahun)}$$

Rekapitulasi hasil perhitungan angkutan sedimen melayang pada ketiga lokasi pengambilan sampel ditunjukkan pada Tabel 9.

Tabel 9. Debit angkutan sedimen dengan Metode Chang, Simon and Richardson

Lokasi	Q_s (kg/hari)	Q_s (ton/tahun)
Hulu	123,61	45,12
Tengah	129,63	47,32
Hilir	187,27	68,35

4.6 Perbandingan Hasil Antar Metode

Perbandingan hasil perhitungan antar metode dihitung dengan Persamaan 15 [14].

$$X = \frac{a - b}{a} \times 100\% \quad (15)$$

dengan x = perbandingan debit perhitungan antar metode, a = debit angkutan Metode Sesaat, b = debit angkutan Metode Empiris.

Tabel 10. Rekapitulasi hasil perhitungan angkutan sedimen melayang

No.	Lokasi	Pengukuran Sesaat (ton/tahun)	Lane & Kalinske (ton/tahun)	Einstein (ton/tahun)	Chang Simon & Richardson (ton/tahun)
1.	(Hulu)	925,40	2180,51	22,23	45,12
2.	(Tengah)	1104,08	2432,40	24,12	47,32
3.	(Hilir)	1179,81	3492,05	33,32	68,35
	Rata-rata	1.069,76	2701,65	26,56	53,60

Debit angkutan sedimen berbanding lurus dengan debit aliran sungainya, semakin besar debit sungai maka akan semakin besar pula debit angkutan sedimen pada sungai tersebut [13]. Debit aliran akan terus meningkat sampai ke daerah hilirnya, hal tersebut diakibatkan oleh aliran dari hulu yang mengalir dan mengisi daerah hilir [5]. Peningkatan debit aliran ini berpengaruh pada debit angkutan sedimen melayang yang terus meningkat pada daerah hilirnya.

Tabel 11. Perbandingan hasil antar metode

Lokasi	Sesaat-Lane & Kalinske	Sesaat - Einstein	Sesaat - Chang Simon & Richardson
Sungai Bone	152,55 % lebih besar	97,52 % lebih kecil	94,99 % lebih kecil

Perbedaan hasil yang signifikan pada tiap metode dipengaruhi oleh parameter yang digunakan di tiap metode.

5. KESIMPULAN

1. Besarnya transpor sedimen melayang dengan Metode Sesaat pada Sungai Bone dengan tiga titik pengambilan sampel (Tulabolo-Alale-Talumolo) berkisar antara 925,40-1179,81 ton/tahun. Menggunakan Metode Lane and Kalinske berkisar antara 2.180,508-3.492,052 ton/tahun. Menggunakan Metode Einstein berkisar antara 22,230-33,323 ton/tahun, sedangkan menggunakan Metode Chang Simon and Richardson berkisar antara 45,12-68,35 ton/tahun.
2. Hasil perbandingan antara formula empiris laju transpor sedimen melayang terhadap pengukuran langsung menunjukkan perbandingan sebesar 152,55% lebih besar untuk formulasi Lane and Kalinske, sedangkan formulasi Einstein menunjukkan perbandingan sebesar 97,52% lebih kecil, dan untuk formulasi Chang Simon and Richardson

Rekapitulasi hasil perhitungan angkutan sedimen ditunjukkan perbandingan pada Tabel 10 dan rekapitulasi hasil perbandingan antar metode ditunjukkan pada Tabel 11.

menunjukkan perbandingan sebesar 94,99% lebih kecil.

6. REFERENSI

- [1] Alitu, A., 2012. *Analisis Pendayagunaan Sumber Daya Air di Wilayah Sungai Limboto Bone Dengan RIBASIM*, Gorontalo: Universitas Negeri Gorontalo.
- [2] Asdak, C., 2010. *Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- [3] Diansari, R., 2014. Analisis Perhitungan Muatan Sedimen (Suspended Load) pada Muara Sungai Lilin Kabupaten Musi - Banyumas. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 2(2).
- [4] Harijanto, H., Wahid, A., Sudhartono, A. & Perori, N., 2021. Laju Angkutan Sedimen Melayang di Sungai Wimbi Sub DAS Wimbi Kabupaten Poso. *Jurnal Hutan Tropis*, 9(1), pp. 43-49.
- [5] Ilyasa, A., Kadir, S. & Rinakanti, 2020. Analisis Debit Air dan Muatan Suspensi pada DAS Dua Laut Tanah Bumbu Kalimantan Selatan. *Jurnal Sylva Scientiae*, 3(1).
- [6] Isma, F., Purwandito, M. & Ismida, Y., 2020. *Pengangkutan Sedimen (Teori, Aplikasi dan Metode Numerik)*. 1 penyunt. Aceh: Harapan Cerdas.
- [7] Koesnandar, R. T. & Hardwinarto, S., 2007. Kajian Degradasi Lahan dan Air di Daerah Aliran Sungai (DAS) Sengata, Kalimantan Timur. *RIMBA Kalimantan Fakultas Kehutanan Unmul*, 12(1), pp. 67-75.
- [8] Kuba, M. S. S., Suryana, I. & Lisnawati, 2019. Studi Pengaruh Bangunan Consolidation DAM CD 1-1 Terhadap LajunSedimentasi Di Sungai Jeneberang. *Jurnal Teknik Hidro*, 12(1).
- [9] Marzuki, I. W., 2018. Perkembangan Morfologi Kota Gorontalo Dari Masa Traditional Hingga Kolonial. *Berkala Arkeologi*, 38(1), pp. 39-58.

- [10] Ningsih, S., Isma, F. & Lydia, E. N., 2020. Studi Angkutan Sedimen Layang (Suspended Load) di Estuari Kuala Langsa. *Jurnal Media Teknik Sipil Samudra*, 1(2), pp. 31-37.
- [11] Olii, A. H. & Pasingi, N., 2022. Muara Sungai Bone Teluk Tomini sebagai Habitat Ikan Nike: Laju Sedimentasi dan Karakteristik Fisika, Kimia, Perairan.. *Aquatic Resources Management and Study Programme*, 15(6).
- [12] Reynaldo & Pranoto, W. A., 2019. Kajian Tiga Rumus Sedimen Melayang Sungai Serayu Dibandingkan dengan Hasil Laboratorium. *Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 2(4), pp. 211-220.
- [13] Sembiring, A. E., Mananoma, T., Halim, F. & Wuisan, E. M., 2014. Analisis Sedimentasi di Muara Sungai Panasen. *Jurnal Sipil Statik*, 2(3), pp. 148-154.
- [14] Siwamba, T. M., Nurhayati & Nimala, A., 2018. Angkutan Sedimen Layang pada Saluran Terbuka di Parit Tokaya Kota Pontianak. *JeLAST: Jurnal Teknik Kelautan PWL Sipil dan Tambang*, 3(5).
- [15] Triatmodjo, B., 2008. *Hidrologi Terapan*. Yogyakarta: Beta Offset Yogyakarta.
- [16] Tukayo, R. K. & Tarigan, S. D., 2011. Dampak Perubahan Tata Guna Lahan dan Pengelolaan Lahan Terhadap Pasokan Air Irigasi di Pesisir Utara Jawa. *J. Top Soils*, 18(2), pp. 169-176.
- [17] Utama, K. A. & Husnan, R., 2015. *Pengendalian Transpor Sedimen Sungai sebagai Upaya Pengendalian Banjir di Kota Gorontalo*, Gorontalo: UNG Repository.