

IDENTIFIKASI KARAKTERISTIK DISTRIBUSI UKURAN BUTIR DAN KETIDAKSERAGAMAN SEDIMEN PADA SUNGAI WAY LUNIK

Miskar Maini^{1*}, Ayudia Hardiyani Kiranaratri², Junita Eka Susanti³, Cahyo Agung Saputra⁴,

^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknologi Infrastruktur dan Kewilayahan, Institut Teknologi Sumatera

*Email: miskar.maini@si.itera.ac.id

Abstrak

Karakteristik distribusi ukuran butir dan tingkat ketidakseragaman sedimen memainkan peran krusial dalam memahami dinamika transpor sedimen di suatu sungai. Studi ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik distribusi ukuran butir serta tingkat ketidakseragaman sedimen pada Sungai Way Lunik guna mengidentifikasi pola distribusi dan implikasinya terhadap proses transpor sedimen. Pengambilan sampel dilakukan pada sembilan cross-section sepanjang sungai untuk mencerminkan variasi kondisi hidraulik dan sumber material sedimen. Analisis laboratorium dilakukan dengan metode pengayakan (sieving) untuk fraksi kasar dan analisis hidrometer untuk fraksi halus. Tingkat ketidakseragaman butiran sedimen dianalisis menggunakan empat metode, yaitu Geometric Standard Deviation, Sorting Coefficient, Kramer's Uniformity Coefficient, dan Sakai Uniformity Coefficient. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sedimen Sungai Way Lunik memiliki variasi ukuran butir yang cukup besar. Uji laboratorium mengungkap bahwa sedimen di bagian hulu didominasi oleh kerikil, bagian tengah oleh pasir sangat besar, dan bagian hilir oleh pasir sedang hingga kasar. Lokasi CSSWL V memiliki tingkat ketidakseragaman tertinggi dengan rentang ukuran butiran mulai dari halus hingga gravel akibat kecepatan aliran yang rendah, sedangkan CSSWL VII menunjukkan tingkat keseragaman tertinggi. Variasi ini berpengaruh terhadap proses transpor sedimen, terutama di CSSWL V yang berisiko mengalami pendangkalan akibat akumulasi material sedimen. Oleh karena itu, tindakan mitigasi seperti pengerukan perlu dipertimbangkan untuk menjaga dinamika aliran dan kestabilan morfologi sungai.

Kata kunci: distribusi ukuran butir, ketidakseragaman sedimen, Sungai Way Lunik, transportasi sedimen.

Abstract

The characteristics of grain size distribution and the degree of sediment non-uniformity play a crucial role in understanding sediment transport dynamics in a river. This study aims to analyze grain size distribution characteristics and sediment non-uniformity level in the Way Lunik River to identify distribution patterns and their implications for the sediment transport process. Sampling was carried out at nine cross-sections along the river to reflect variations in hydraulic conditions and sediment material sources. Laboratory analysis was carried out using the sieving method for the coarse fraction and hydrometer analysis for the fine fraction. The level of non-uniformity of sediment grains was analyzed using four methods, namely Geometric Standard Deviation, Sorting Coefficient, Kramer's Uniformity Coefficient, and Sakai Uniformity Coefficient. The research results show that Way Lunik River sediments have significant grain size variations. Laboratory tests revealed that the sediment in the upstream section was dominated by gravel, coarse sand in the middle section, and medium to coarse sand in the downstream section. Location CSSWL V has the highest level of non-uniformity, with grain sizes ranging from fine to gravel due to low flow velocities. At the same time, CSSWL VII shows the highest level of uniformity. This variation affects the sediment transport process, especially in CSSWL V, which is at risk of shallowing due to the accumulation of sediment material. Therefore, mitigation measures such as dredging need to be considered to maintain flow dynamics and stable river morphology.

Keywords: *grain size distribution, sediment non-uniformity, Way Lunik River, sediment transport*

1. PENDAHULUAN

Sedimentasi merupakan proses alami yang terjadi di sungai akibat erosi dan transportasi material dari hulu ke hilir. Proses ini berperan penting dalam membentuk morfologi sungai dan mempengaruhi ekosistem perairan (Julien, 2018, 1995). Distribusi ukuran butir sedimen di suatu sungai mencerminkan dinamika aliran serta interaksi antara faktor hidraulik dan geologi di daerah aliran sungai (DAS) (Graf, 1998, 1984). Analisis karakteristik distribusi ukuran butir sedimen dapat memberikan informasi mengenai kestabilan sungai serta potensi sedimentasi yang berlebihan yang dapat menyebabkan pendangkalan dan gangguan aliran (Boggs, 2006). Selain itu, distribusi ukuran butir juga mencerminkan mekanisme transportasi sedimen, baik dalam bentuk bedload maupun *suspended load*, yang dipengaruhi oleh kecepatan aliran dan energi hidraulik sungai (van Rijn, 1984).

Sungai Way Lunik, yang terletak di wilayah pesisir, merupakan salah satu sungai yang mengalami tekanan akibat aktivitas antropogenik, seperti perubahan tata guna lahan, pembangunan infrastruktur, serta eksploitasi sumber daya air. Akumulasi sedimen di sungai ini dapat mempengaruhi kapasitas tampungan aliran serta meningkatkan risiko banjir di wilayah sekitarnya (Montgomery and Buffington, 1997). Oleh karena itu, pemahaman mengenai karakteristik distribusi ukuran butir sedimen dan tingkat ketidakseragamannya menjadi penting untuk merancang strategi pengelolaan sungai yang berkelanjutan (Wilcock and Crowe, 2003).

Distribusi ukuran butir sedimen umumnya dinyatakan dalam parameter statistik seperti diameter butir karakteristik (D_{10} , D_{50} , D_{90}), koefisien keseragaman (Cu), dan koefisien gradasi (Cc), yang dapat digunakan untuk menentukan klasifikasi tekstur sedimen dan stabilitas aliran (Folk and Ward, 1957). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa distribusi ukuran butir berpengaruh terhadap kecepatan dan pola transportasi sedimen dalam sistem sungai (Einstein and Abdel-Aal, 1973; Ettema and Mutel, 2004). Faktor-faktor seperti kemiringan dasar sungai, kecepatan aliran, dan turbulensi juga berperan dalam menentukan pergerakan sedimen di sepanjang aliran (Maini et al., 2024, 2023; Parker, 1978; Shields, 1936).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik distribusi ukuran butir sedimen pada Sungai Way Lunik serta mengevaluasi tingkat ketidakseragamannya. Studi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengelolaan sedimen di sungai ini serta mendukung perencanaan konservasi DAS yang lebih efektif (Church and Ferguson, 2015).

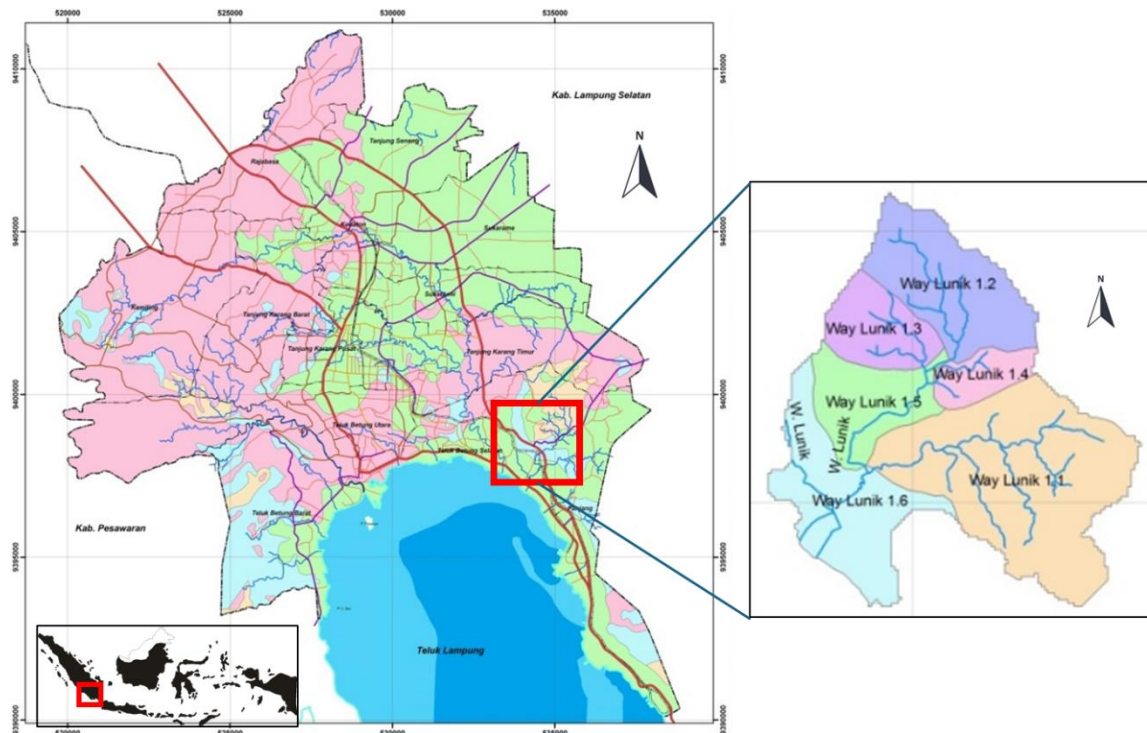
2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini dilakukan dengan cara melibatkan pengukuran dan pengujian sampel material sedimen dasar serta sedimen suspensi yang dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah (Geoteknik), Institut Teknologi Sumatera. Selain itu, penelitian ini juga menggunakan data sekunder yang diperoleh dari studi terdahulu, salah satunya adalah penelitian yang dilakukan oleh Sonia et al., (2020) mengenai sedimentasi dan laju sedimentasi di Sungai Way Lunik. Data sekunder ini dianalisis untuk memahami distribusi ukuran butiran sedimen serta tingkat ketidakseragaman butiran yang terjadi di setiap penampang melintang (*cross-section*) sungai. Peta lokasi penelitian disajikan pada Gambar 1.

Dalam studi ini, Sungai Way Lunik dibagi menjadi sembilan lokasi pengukuran yang mencakup wilayah dari hulu hingga hilir. Lokasi paling hulu berada di sekitar area tambang batu, yang berpotensi memengaruhi karakteristik hidraulik serta dinamika sedimen di sepanjang sungai. Kesembilan titik pengukuran ini digunakan untuk menganalisis profil penampang sungai serta kecepatan aliran, yang merupakan parameter penting dalam memahami dinamika hidraulik sungai.

Setiap titik pengukuran diberi kode identifikasi CSSWL (*Cross Section Sungai Way Lunik*) untuk mempermudah analisis dan interpretasi data. Kode ini terdiri dari "CS" yang merupakan singkatan dari *Cross-Section*, serta "SWL" yang mengacu pada Sungai Way Lunik. Selain itu, setiap titik diberi nomor dengan angka Romawi I hingga IX, yang menunjukkan urutan penampang dari hulu ke hilir (lihat Gambar 2). Sistem penomoran ini bertujuan untuk memfasilitasi identifikasi lokasi pengukuran serta memungkinkan perbandingan perubahan pola aliran dan morfologi sungai di sepanjang jalur penelitian.

Salah satu titik pengambilan sampel yang menjadi referensi utama dalam penelitian ini adalah salah satu *cross-section* di Sungai Way Lunik (CSSWL), yang sebelumnya telah dikaji dalam penelitian Sonia et al. (2020). Penggunaan titik referensi ini memungkinkan validasi data serta analisis perbandingan kondisi sungai dari waktu ke waktu. Selain itu, evaluasi terhadap perubahan karakteristik aliran dan morfologi sungai juga dilakukan untuk menilai dampak aktivitas tambang batu terhadap dinamika sedimentasi serta hidraulika sungai.



Gambar 1. Lokasi penelitian di DAS Way Lunik Kota Bandar Lampung Provinsi Lampung

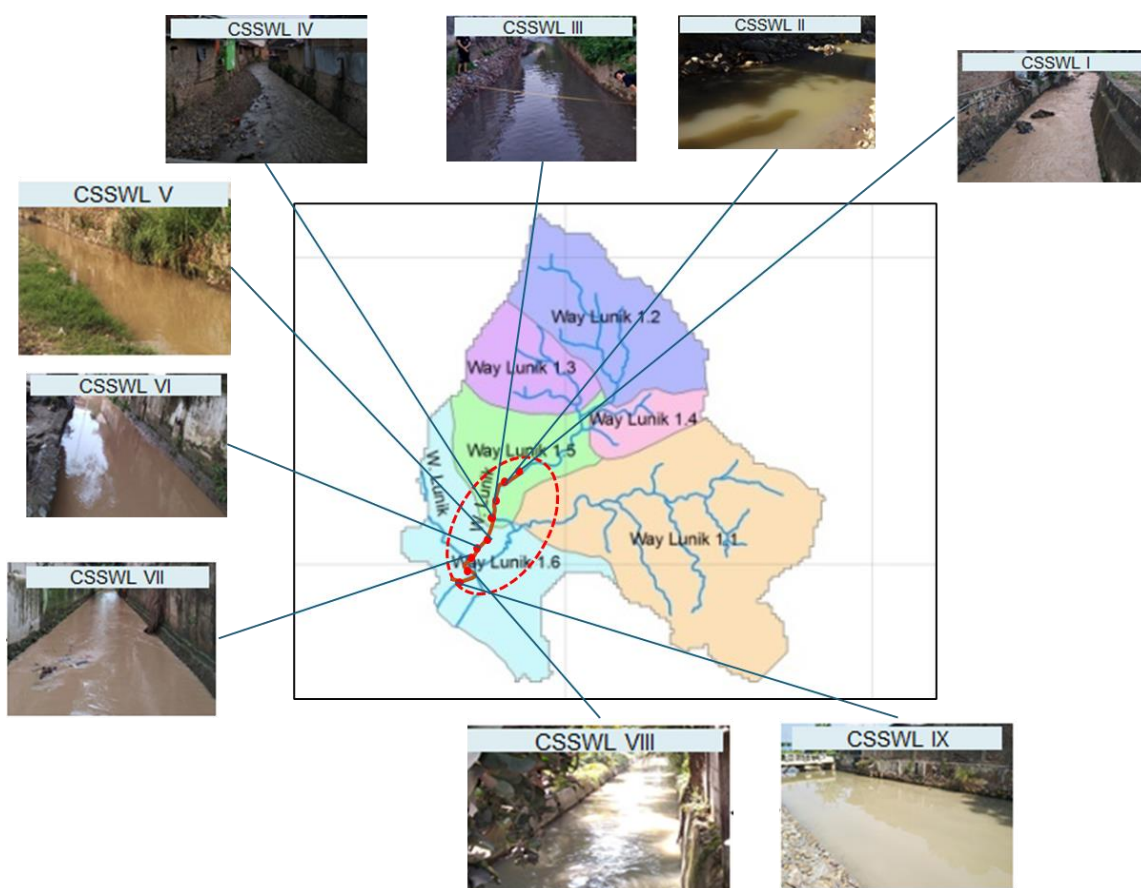
.Prosedur memperoleh ukuran butir material dasar dengan D_{50} tertentu perlu dilakukan dengan analisis saringan butiran, di mana penyaringan dimaksudkan agar dapat memberikan hasil analisis gradasi distribusi butiran material dasar yang akan digunakan untuk *running*. Untuk mengetahui aspek ketidakseragaman material butiran sedimen maka perlu diketahui terlebih dahulu ukuran butir material dasar yang meliputi D_5 , D_{16} , D_{25} , D_{50} , D_{75} , D_{84} , D_{85} , D_{90} dan D_{95} , dalam menentukan besaran nilai ukuran butiran ini dihitung berdasarkan kurva distribusi ukuran partikel persentase lolos kumulatif pada kertas probabilitas antara dua pasangan data yang diketahui pada ukuran ayakan dalam satuan ϕ dan nilai persentilnya berdasarkan data pengujian dari Gambar 3 dan 4.

Untuk ukuran kelas partikel dalam satuan mm, perhitungannya membutuhkan interpolasi logaritmik. Teknis menghitung nilai D_{50} dengan cara menginterpolasi data hasil pengujian analisis saringan pada sampel material dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Jackson and Richardson, 2007):

$$\phi_i = (x_2 - x_1) \left(\frac{y_i - y_1}{y_2 - y_1} \right) + x_1 \quad (1)$$

$$d_i = 10^{\left[(\log x_2 - \log x_1) \left(\frac{y_i - y_1}{y_2 - y_1} \right) + \log x_1 \right]} \quad (2)$$

di mana y_2 dan y_1 adalah dua nilai dari frekuensi persen kumulatif di bawah dan di atas frekuensi kumulatif yang dicari y_x , x_2 dan x_1 adalah ukuran partikel dalam satuan milimeter yang sesuai dengan frekuensi kumulatif y_2 dan y_1 .



Gambar 2. Lokasi pengambilan sampel material sedimen dan pengukuran di Sungai Way Lunik

Tabel 1. Klasifikasi ukuran butiran menurut AGU (*American Geophysical Union*).

Fraksi (<i>Interval/Range</i>) (mm)	Nama
4096 – 2048	<i>Very Large Boulder</i>
2048 – 1024	<i>Large Boulder</i>
1024 – 512	<i>Medium Boulder</i>
512 – 256	<i>Small Boulder</i>
256 – 128	<i>Large Cobble</i>
128 – 64	<i>Small Cobble</i>
64 – 32	<i>Very Coarse Gravel</i>
32 – 16	<i>Coarse Gravel</i>
16 – 8	<i>Medium Gravel</i>
8 – 4	<i>Fine Gravel</i>
4 - 2	<i>Very Fine Gravel</i>
2 – 1	<i>Very Coarse Sand</i>
1 – 0.5	<i>Coarse Sand</i>
< 0.5	<i>< Coarse Sand</i>

Sumber: Garde & Rangga Raju, (2000)

Pada umumnya kurva distribusi frekuensi kumulatif dari material sedimen alami memperlihatkan kurva S-simetri apabila digambarkan pada grafik semi-log, untuk data yang mengikuti distribusi log-normal, standar deviasi geometrik σ_g dapat dihitung menurut persamaan berikut (Garde and Rangga Raju, 2000) :

$$\sigma_g = \frac{d_{84,1}}{d_{50}} = \frac{d_{50}}{d_{15,9}} \quad (3)$$

Alternatif lainnya adalah dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\sigma_g = \frac{1}{2} \left(\frac{d_{84,1}}{d_{50}} + \frac{d_{50}}{d_{15,9}} \right) \quad (4)$$

di mana $\sigma_g \leq 1$ termasuk butiran seragam dan $\sigma_g > 1$ termasuk butiran tidak seragam (*non-uniform*). selain menggunakan standar deviasi, penyebaran kurva distribusi frekuensi dapat dilihat berdasarkan nilai bilangan tak berdimensi S_c (*sorting coefficient*), yang didefinisikan sebagai:

$$S_c = \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}} \quad (5)$$

Dalam menentukan tingkat keseragaman butiran dapat digunakan beberapa kriteria, diantaranya yaitu berdasarkan koefisien keseragaman Kramer (*Kramer's uniformity coefficient*) M , yang didefinisikan sebagai berikut

$$M = \frac{\sum_{i=0}^{50} \Delta p_i d_i}{\sum_{i=50}^{100} \Delta p_i d_i} \quad (6)$$

dengan :

M = Koefisien keseragaman Kramer

Δp_i = Presentase dari butiran dengan ukuran d_i (%)

d_i = Diameter butiran setiap fraksi (mm)

di mana untuk butiran seragam, koefisien keseragaman Kramer (M) = 1.

Selain Kramer uji keseragaman butiran dapat menggunakan parameter koefisien keseragaman Sakai parameter β sebagai berikut :

$$\beta = \frac{2+M}{1+2M} \quad (7)$$

Dengan :

β = Koefisien keseragaman Sakai

M = Koefisien keseragaman Kramer

di mana untuk butiran seragam koefisien keseragaman Sakai (β) = 1.

Tabel 2. Kriteria ketidakseragaman butiran material dasar.

Metode	Kriteria
<i>Geometric Standard Deviation</i> (σ_g)	$\sigma_g > 1$, butiran tidak seragam
<i>Sorting Coefficient</i> (S_c)	$S_c = 1$, butiran seragam
	$1.0 \leq S_c \leq 2.0$; butiran sedang
	$2.0 \leq S_c \leq 4.5$; material sedimen alami
<i>Kramer's uniformity coefficient</i> (M)	$M = 1$, butiran seragam
<i>Sakai uniformity coefficient</i> (β)	$\beta = 1$, butiran seragam

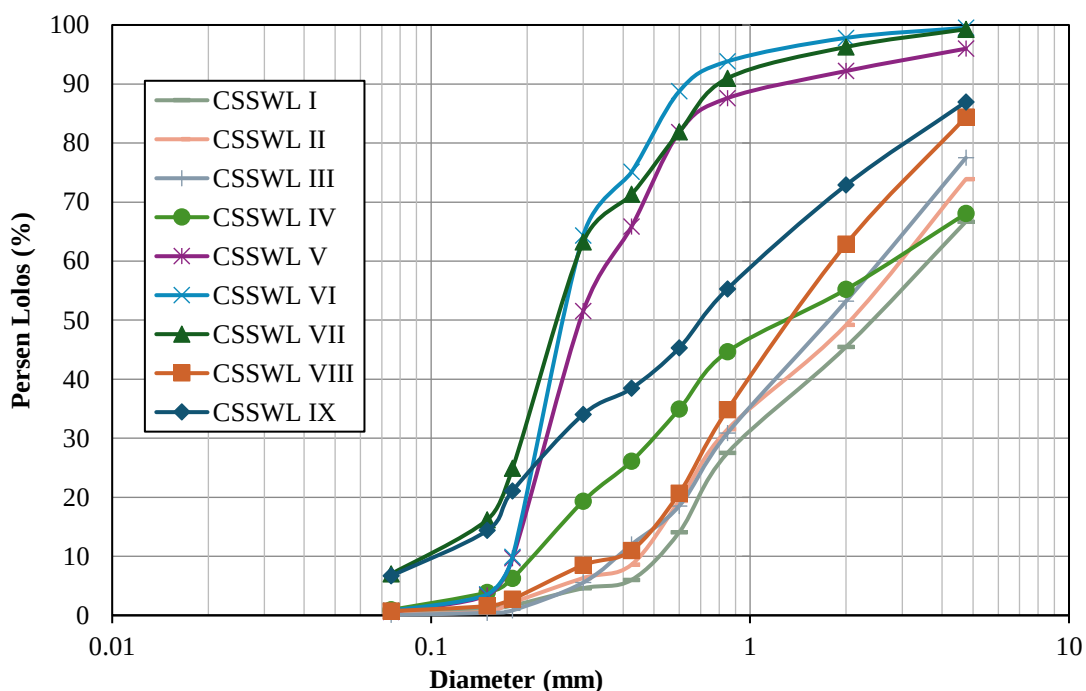
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian analisis saringan digunakan untuk menentukan karakteristik butiran kasar, yaitu sedimen yang tertahan pada saringan No. 200 (0,075 mm). Sementara itu, pengujian hidrometer dilakukan untuk menganalisis butiran halus, yakni sedimen yang lolos saringan No. 200. Kedua metode pengujian ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik material sedimen secara lebih mendetail.

Hasil pengujian laboratorium menunjukkan variasi karakteristik material sedimen di sepanjang Sungai Way Lunik pada berbagai penampang (*cross-section*). Pada *Cross-Section* I dan II, sekitar 50% sedimen berupa kerikil dengan diameter rata-rata 2,29 mm. Di *Cross-Section* III dan IV, sedimen didominasi oleh pasir sangat besar dengan diameter masing-masing 1,83 mm dan 1,43 mm.

Perubahan karakteristik sedimen semakin terlihat pada *Cross-Section* V, VI, dan VII, di mana 50% material sedimen terdiri dari pasir sedang dengan diameter masing-masing 0,29 mm, 0,26 mm, dan 0,26 mm. Selanjutnya, di *Cross-Section* VIII, komposisi sedimen kembali mengalami perubahan dengan dominasi pasir sangat besar berdiameter 1,7 mm. Terakhir, di *Cross-Section* IX, jenis sedimen yang dominan adalah pasir kasar dengan diameter 0,72 mm.

Pola distribusi ukuran sedimen ini mencerminkan variasi hidrodinamika aliran sungai serta proses transportasi sedimen dari hulu ke hilir. Analisis ini memberikan gambaran yang jelas mengenai distribusi ukuran butiran sedimen di sepanjang Sungai Way Lunik, yang secara dominan terdiri dari pasir. Hasil uji gradasi butiran tersebut dapat dilihat pada Gambar 3..

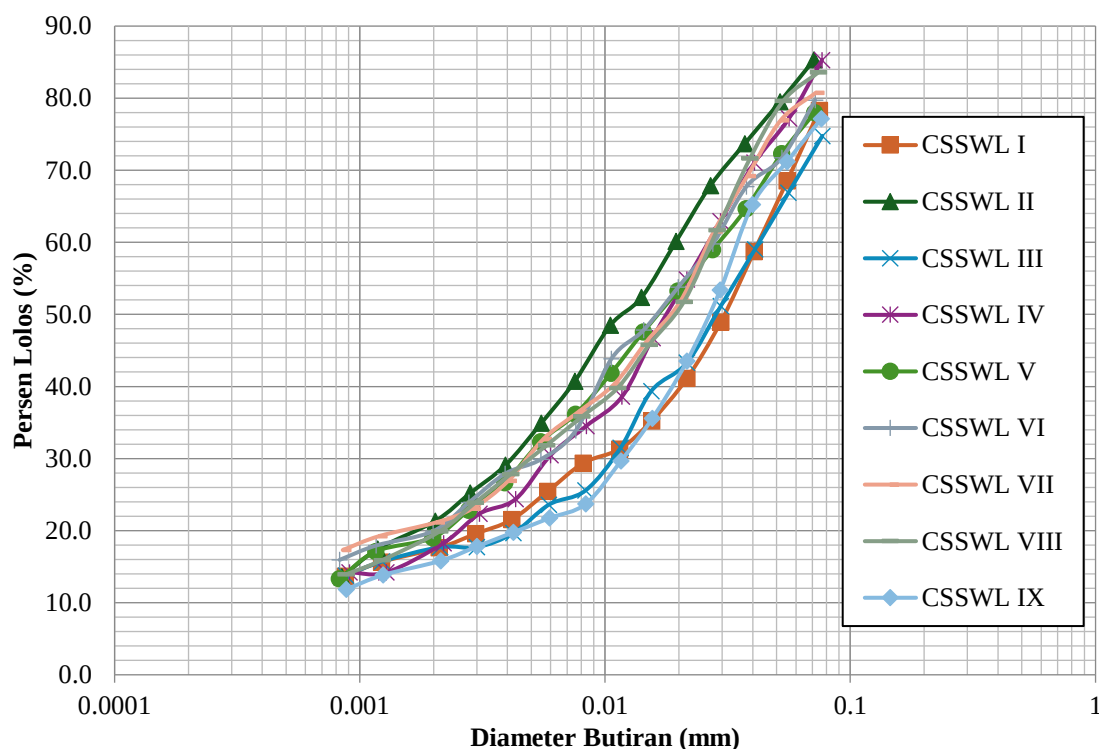


Gambar 3. Kurva distribusi ukuran butiran material dasar (*bed-load*) Sungai Way Lunik

Selanjutnya hasil pengujian hidrometer digunakan untuk menganalisis sedimen dalam fraksi halus, terutama sedimen tersuspensi (*suspended load*) di Sungai Way Lunik. Metode ini bertujuan untuk menentukan distribusi ukuran partikel sedimen yang berukuran sangat kecil, seperti lanau (*silt*) dan lempung (*clay*), yang tetap tersuspensi dalam air untuk waktu yang lama.

Grafik hasil uji hidrometer yang disajikan pada Gambar 4 menunjukkan distribusi ukuran partikel sedimen suspensi berdasarkan persentase lolos terhadap diameter butiran dalam skala logaritmik. Dari grafik, terlihat bahwa semua sampel mengalami tren peningkatan persentase lolos seiring dengan bertambahnya ukuran butiran, yang mengindikasikan dominasi fraksi halus seperti lanau dan lempung dalam sampel. Variasi antar sampel terlihat dalam bentuk perbedaan kemiringan kurva, di mana beberapa sampel memiliki distribusi yang lebih merata sementara yang lain menunjukkan perubahan tajam pada ukuran tertentu.

Perbedaan distribusi butiran ini dapat dikaitkan dengan kondisi angkutan sedimen suspensi cukup besar dan beragam di lokasi pengambilan sampel. Misalnya, sampel dengan persentase lolos yang lebih tinggi pada diameter butiran kecil cenderung memiliki kandungan lempung yang lebih dominan, sementara yang memiliki transisi lebih landai mengandung lebih banyak lanau. Grafik ini sangat berguna dalam analisis pemodelan transpor sedimen untuk keperluan teknik sipil bidang sumber daya air.



Gambar 4. Hasil pengujian hidrometer pada material sedimen suspensi di Sungai Way Lunik

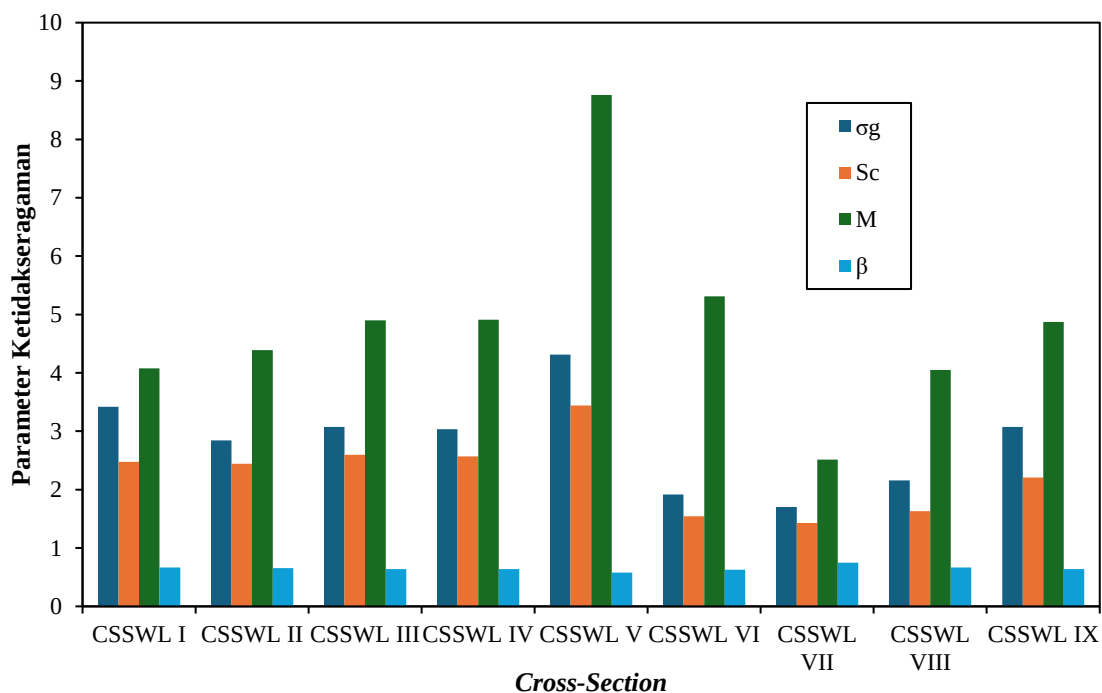
Hasil uji ketidakseragaman butiran sedimen di Sungai Way Lunik (CSSWL) yang disajikan pada Tabel 3 dan Gambar 5 menunjukkan variasi ukuran butiran yang cukup beragam di setiap lokasi pengambilan sampel. Nilai *Geometric Standard Deviation* (σ_g) berkisar antara 1.71 hingga 4.31, di mana CSSWL V memiliki nilai tertinggi, menunjukkan tingkat ketidakseragaman material sedimen *bed-load* yang paling besar. Sebaliknya, CSSWL VII memiliki nilai σ_g terendah sebesar 1.71, yang mengindikasikan ukuran butiran lebih mendekati seragam dibandingkan lokasi lainnya. Koefisien keseragaman *Sorting Coefficient* (Sc) menunjukkan pola yang serupa, dengan rentang nilai antara 1.43 hingga 3.44, di mana CSSWL VII memiliki tingkat keseragaman tertinggi, sedangkan CSSWL V menunjukkan variasi ukuran butiran yang paling besar.

Analisis ketidakseragaman butiran menurut metode *Kramer's uniformity coefficient* (M) juga menunjukkan perbedaan yang signifikan di antara sampel sedimen dasar di Sungai Way Lunik, dengan nilai terendah pada CSSWL VII sebesar 2.51 dan tertinggi pada CSSWL V sebesar 8.76, yang menunjukkan bahwa CSSWL V memiliki rentang variasi ketidakseragaman ukuran butiran sedimen yang paling besar, di lokasi CSSWL V ini terjadi pengendapan sedimen yang beragam dari butiran halus hingga butiran besar seperti gravel, hal ini disebabkan pada lokasi ini kondisi kecepatan aliran tidak begitu besar sehingga material sedimen dasar maupun sedimen suspensi berpotensi besar terjadi pengendapan secara masif. Selain itu analisis aspek ketidakseragaman butiran sedimen metode *Sakai uniformity coefficient* (β) berada dalam rentang 0.58 hingga 0.75, di mana nilai tertinggi pada CSSWL VII menunjukkan bentuk butiran yang mendekati butiran seragam, sedangkan nilai terendah pada CSSWL V mengindikasikan bentuk yang lebih bervariasi. Secara keseluruhan, CSSWL V memiliki tingkat ketidakseragaman butiran yang paling tinggi, sedangkan CSSWL VII menunjukkan tingkat keseragaman terbaik. Karakteristik ini dapat memengaruhi proses transpor sedimen di *cross section* V dimana di lokasi CSSWL V ini perlu mendapatkan perhatian secara

khusus untuk dilakukan pengerukan sedimen agar sungai tidak mengalami pendangkalan yang signifikan yang berimplikasi pada dinamika aliran dan morfologi sungai.

Tabel 3 Rekapitulasi Analisis Ketidakseragaman butiran sedimen di Sungai Way Lunik

Variasi	Parameter ketidakseragaman butir			
Material	σ_g	S_c	M	β
MATERIAL DASAR ASLI				
CSSWL I	3.42	2.48	4.08	0.66
CSSWL II	2.84	2.44	4.39	0.65
CSSWL III	3.07	2.60	4.90	0.64
CSSWL IV	3.04	2.57	4.91	0.64
CSSWL V	4.31	3.44	8.76	0.58
CSSWL VI	1.92	1.54	5.31	0.63
CSSWL VII	1.71	1.43	2.51	0.75
CSSWL VIII	2.16	1.63	4.05	0.66
CSSWL IX	3.07	2.21	4.87	0.64



Gambar 5. Aspek ketidakseragaman butiran sedimen di Sungai Way Lunik

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium dan analisis dapat ditarik kesimpulan yaitu hasil pengujian laboratorium menunjukkan variasi karakteristik sedimen di sepanjang Sungai Way Lunik, dengan dominasi kerikil di hulu, pasir sangat besar di tengah, dan pasir sedang hingga kasar di hilir. CSSWL V memiliki tingkat ketidakseragaman tertinggi dengan rentang ukuran dari butiran halus hingga gravel akibat kecepatan aliran yang rendah, sementara CSSWL VII memiliki keseragaman terbaik. Variasi ini memengaruhi proses transportasi sedimen, terutama di CSSWL V yang berisiko mengalami pendangkalan, sehingga perlu dilakukan pengerukan untuk menjaga dinamika aliran dan morfologi sungai.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Boggs, S., 2006. Principles of stratigraphy and sedimentology. Principles of stratigraphy and sedimentology.
- Church, M., Ferguson, R.I., 2015. Morphodynamics: Rivers beyond steady state. *Water Resour Res* 51. <https://doi.org/10.1002/2014WR016862>
- Einstein, H.A., Abdel-Aal, F.M., 1973. Closure to "Einstein Bed-Load Function at High Sediment Rates." *Journal of the Hydraulics Division* 99. <https://doi.org/10.1061/jyceaj.0003718>
- Ettema, R., Mutel, C.F., 2004. Hans Albert Einstein: Innovation and Compromise in Formulating Sediment Transport by Rivers. *Journal of Hydraulic Engineering* 130. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2004\)130:6\(477\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2004)130:6(477))
- 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. <https://doi.org/10.1306/74d70646-2b21-11d7-8648000102c1865d>
- Garde, R.J., Rangga Raju, K.G., 2000. Mechanics of Sediment Transport and Alluvial Stream Problems. New Age International Publisher, New Delhi.
- Graf, W.H., 1998. Fluvial Hydraulics Flow and Transport Processes in Channels of Simple Geometry, NASPA Journal.
- Graf, W.H., 1984. Hydraulics of sediment transport. Hydraulics of sediment transport. <https://doi.org/10.5772/25982>
- Jackson, D.R., Richardson, M.D., 2007. High-Frequency Seafloor Acoustics, High-Frequency Seafloor Acoustics. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-36945-7>
- Julien, P.Y., 2018. River Mechanics, Second Edition, River Mechanics, Second Edition. <https://doi.org/10.1017/9781316107072>
- Julien, P.Y., 1995. Erosion and sedimentation. Erosion and sedimentation. <https://doi.org/10.1029/99eo00128>
- Maini, M., Kironoto, B.A., Istiarto, Pamudji, A.P., 2024. Evaluating Manning's Roughness Coefficient for Flows with Equilibrium and Non-equilibrium Sediment Transport. *Jordan Journal of Civil Engineering* 18, 65–80. <https://doi.org/10.14525/JJCE.v18i1.06>
- Maini, M., Kironoto, B.A., Rahardjo, A.P., Istiarto, 2023. Flow Characteristics of Equilibrium and Non-equilibrium Sediment Transport Flows. *International Journal of GEOMATE* 25, 77–86. <https://doi.org/10.21660/2023.110.3957>
- Montgomery, D.R., Buffington, J.M., 1997. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Bulletin of the Geological Society of America* 109. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1997\)109<0596:CRMIMD>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1997)109<0596:CRMIMD>2.3.CO;2)
- Parker, G., 1978. Self-formed straight rivers with equilibrium banks and mobile bed. Part 2. The gravel river. *J Fluid Mech* 89. <https://doi.org/10.1017/S0022112078002505>
- Shields, I.A., 1936. Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. [English title: Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement]. Preussische Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau 26.
- Sonia, Darsono, S.L.W., Maini, M., 2020. Studi Karakteristik Sedimen dan Laju Angkutan Sedimen di Sungai Way Lunik, in: Himpunan Ahli Teknik Hidraulik Indonesia (Ed.), Pertemuan Ilmiah Tahunan (PIT) Himpunan Ahli Teknik Hidraulik Indonesia (HATHI) Ke-37. Himpunan Ahli Teknik Hidraulik Indonesia, Palembang, pp. 397–408.
- van Rijn, L.C., 1984. Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering* 110. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(1984\)110:10\(1431\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(1984)110:10(1431))
- Wilcock, P.R., Crowe, J.C., 2003. Surface-based Transport Model for Mixed-Size Sediment. *Journal of Hydraulic Engineering* 129. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2003\)129:2\(120\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2003)129:2(120))