

### **PERUBAHAN ELEVASI DASAR PADA ABUTMEN JEMBATAN AKIBAT PROSES KESTABILAN GERAK SEDIMEN TERHADAP PENEMPATAN KRIB DI TIKUNGAN SUNGAI (Studi Kasus : Sungai Harapan, Kabupaten Jayapura)**

**Widyastuti, I<sup>1</sup>, Mujiati<sup>2</sup>, Jansen D. I. R.<sup>3</sup>**

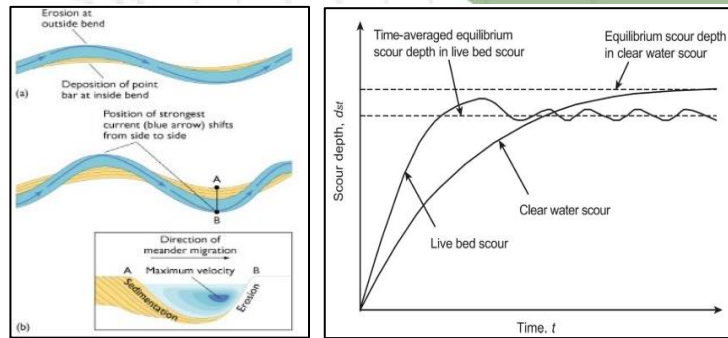
*Departemen Teknik Sipil, Universitas Cenderawasih, Papua, [\\*iwidyastuti09@gmail.com](mailto:iwidyastuti09@gmail.com).*

#### **ABSTRAK**

Gerusan terjadi pada saat kecepatan aliran pada saluran melebihi kecepatan yang menyebabkan material dasar bergerak. Hal ini terjadi pada Sungai Harapan yang memiliki dampak yang sangat signifikan terhadap penurunan dasar sungai dan penyempitan oleh bangunan air (abutmen jembatan) yang melintang di sungai. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kestabilan gerak sedimen di sekitar abutmen jembatan, sebelum dan sesudah adanya krib sehingga selanjutnya kegagalan struktur dapat dihindarkan. Pengukuran morfologi sungai dan pengambilan sampel sedimen dilakukan di sekitar abutmen jembatan sebanyak 6 titik dan sample material dasar menggunakan metode *Pebble Count* dengan jalur *zigzag*. Klasifikasi diameter butir material dasar menggunakan standar klasifikasi sturgess dan proses sebaran material dianalisis menggunakan kurva *Hjustorm*. Transformasi curah hujan rancang menjadi debit banjir rancang yang kemudian disimulasi menggunakan aplikasi *iRIC Nays2DH* dengan membandingkan keadaan sungai sebelum dan sesudah pemasangan krib. Variasi rerata diameter butiran berkisar 14.85 - 20.23mm dengan debit aliran 1,838 m<sup>3</sup>/s/mm. Pada abutmen tanpa krib di setiap diameter butiran sedimen terjadi gerusan yang langsung bersinggungan dengan abutmen yang berada di sisi kanan. Sedangkan pada abutmen dengan krib, gerusan juga terjadi namun tidak bersinggungan langsung dengan kedua abutmen. Krib melindungi abutmen dari risiko terjadinya gerusan di sekitar struktur abutmen. Degradasi dasar saluran tetap terjadi setelah pemasangan krib, namun degradasi tersebut tidak terjadi di struktur abutmen, krib mencegah dan melindungi abutmen agar dasar sungai tidak tergerus.

#### **PENDAHULUAN**

Gerusan lokal pada abutmen dan pilar jembatan merupakan masalah utama pada komunitas riset hidrolik karena dampak yang dihasilkan secara sosial dan ekonomi. Fenomena studi eksperimental dan numerik tentang proses gerusan memberikan dukungan untuk menafsirkan dinamikanya. Penyelidikan gerusan yang terjadi di abutment dapat dipengaruhi oleh beberapa parameter. [1] menunjukkan konsistensi gerusan dengan memanfaatkan tanggul abutment yang mudah tererosi. [2] [3] menyatakan pengaruh bentuk panjang abutmen mempengaruhi kedalaman dan lebar gerusan. Selanjutnya menambahkan elemen di dinding abutmen akan mengurangi kedalaman gerusan di abutmen [4][5][6]. Penelitian yang menggambarkan pola aliran yang terjadi akibat hambatan [7][8][9] (anna teruzi, mete koken, Vincenzo armenio). Sungai yang ada saat ini merupakan proses yang terus menerus berlangsung dan akan terus berkembang. Tahap proses perkembangan sungai terbagi menjadi 5 stadia yaitu stadia awal, stadia muda, stadia dewasa, stadia tua dan stadia peremajaan (*rejuvenation*). Dinamika proses perkembangan sungai merupakan hasil kerja antara aliran sungai dengan material dasar sungai yang mengontrol mekanisme bekerja di sungai tersebut.



Gambar 1 (a) skema aliran sungai normal (b) skema antara live bed-scour dan clear-water scour terhadap waktu

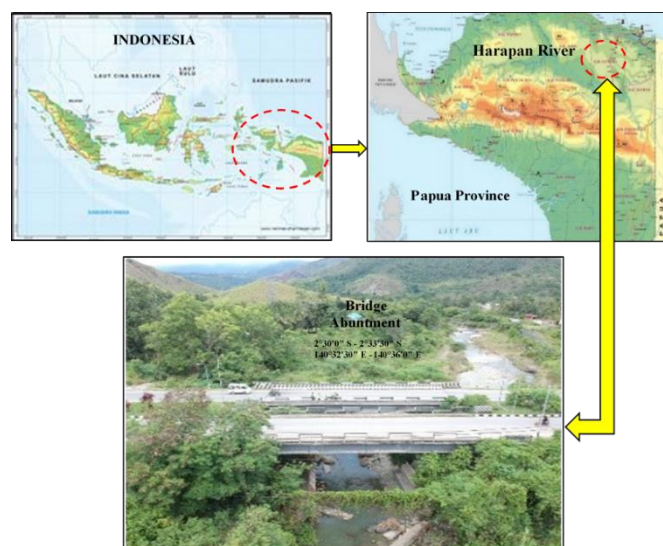
Gambar 1 (a) merupakan skema aliran sungai dan kondisi erosi dan deposisi yang terjadi secara umum sedangkan (b) menunjukkan bahwa ada korelasi yang baik antara kedalaman gerusan dan waktu. Terlihat jelas grafiknya diasumsikan bahwa lamanya durasi mempengaruhi kedalaman gerusan kesetimbangan pada gerusan air jernih [10]. Variasi waktu dari gerusan air jernih dan gerusan dasar ditunjukkan secara skematis.

Efek interaksi antara abutmen dan aliran air merupakan gangguan lokal pada aliran. Hal ini dapat menyebabkan percepatan aliran melalui abutmen jembatan dan meningkatkan turbulensi, yang dapat mengakibatkan penurunan permukaan dasar saluran tingkat yang dapat mengganggu struktur jembatan. Turunnya dasar saluran ini dikenal sebagai lokal [11]. Pada bagian hilir (samping) abutment kecepatan aliran cenderung lambat dan berputar (*vortex*), namun energi yang dihasilkan tidak besar sehingga gerusan yang terjadi cenderung terendapkan secara lokal dan akan terjadi aggradasi di sekitarnya abutmen [12].

## Metodologi Studi

### Lokasi sampling

Kabupaten Jayapura memiliki beberapa sungai yang bermuara di Danau Sentani, salah satu sungai besar yang terdapat di Kabupaten Jayapura yaitu Sungai Harapan memiliki panjang 9.07 km dan luas 1.88 ha. Lokasi pengambilan sampel berada di sekitar 1 Km dari hilir dan 6 titik di abutmen jembatan. Sungai Harapan berada pada koordinat 2°30'0" LS - 2°33'30" LS dan 140°32'30" BT - 140°3'0" BT.



Gambar 2. Lokasi abutmen jembatan, Papua-Kabupaten Jayapura, Indonesia



Pengukuran sungai dan pengambilan sample sedimen berbutir dilakukan sejauh 1,00 Km dari hulu abutmen dengan menggunakan metode *pebble count* dengan pola *zigzag* terbagi di 5 (lima) titik sample.

## Hidrologi sungai

Analisa hidrologi yang sering dilakukan adalah estimasi kejadian banjir maksimum, terutama karena perencanaan dan perancangan sumber air dan manajemen banjir tergantung dari frekuensi dan besarnya puncak aliran debit. Debit banjir rancangan dapat dihitung dalam hidrograf satuan sintesis dimaksud yaitu dengan menggunakan Metode Nakayasu. Hidrograf Banjir Rancangan Satuan Sintetik metode Nakayasu dipakai untuk memperkirakan debit banjir yang akan terjadi, dilakukan melalui analisis *Rainfall (Run off Model)* dengan metode Nakayasu [13]. Parameter HSS Nakayasu diberikan dalam persamaan-persamaan berikut ini:

$$Q_p = \frac{1}{3,6} \left( \frac{A.R_e}{0,3T_p + T_{0,3}} \right) \quad (1)$$

$$T_p = T_g + 0,8T_r \quad (2)$$

Untuk panjang sungai lebih dari 15 km digunakan nilai:

$$T_g = 0,4 + 0,058 \cdot L \quad (3)$$

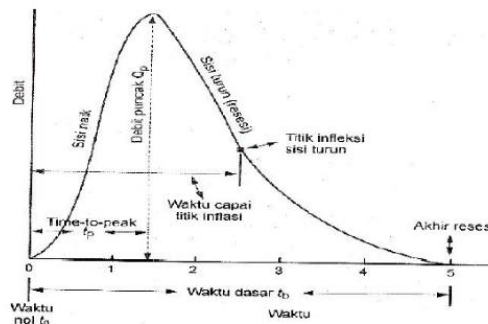
Untuk panjang sungai kurang dari 15 km digunakan nilai:

$$T_g = 0,21 + L^{0,7} (2.4a)$$

$$T_{0,3} = \alpha \cdot T_g$$

$\alpha =$  antara 1,5 hingga 3

dengan:  $Q_p$  = debit puncak banjir ( $m^3/detik$ ) ;  $A$  = luas DAS ( $km^2$ ) ;  $R_e$  = curah hujan efektif (mm) ;  $T_p$  = waktu dari permulaan banjir sampai puncak hidrograf banjir (mm) ;  $T_{0,3}$  = waktu dari puncak banjir sampai 0,3 kali debit puncak banjir (jam) ;  $T_g$  = waktu konsentrasi ;  $T_r$  = satuan waktu dari curah hujan (mm) ;  $\alpha$  = koefisien karakteristik DAS ;  $L$  = panjang sungai utama (km).



Gambar 3. Komponen Hidrograf

## Karakteristik dan awal gerak butir sedimen

Material dasar sangat mempengaruhi resistensi badan sungai terhadap tenaga aliran air yang dapat menggerus sungai. Semakin besar ukuran-ukuran butir maka semakin besar resistensi sungai terhadap gerusan. Ukuran butir sedimen merupakan salah satu karakteristik yang paling penting dan banyak digunakan dalam persamaan transpor sedimen [14]. Akibat adanya aliran air, timbul gaya-gaya yang bekerja pada material sedimen. Pada waktu gaya-gaya yang bekerja pada butiran sedimen mencapai suatu harga tertentu, sehingga apabila sedikit gaya ditambah akan menyebabkan butiran sedimen bergerak, maka kondisi tersebut disebut kondisi kritis. Parameter aliran pada kondisi tersebut, seperti

tegangan geser ( $\tau_0$ ), kecepatan aliran ( $U$ ) juga mencapai kondisi kritis. Sehingga angka shield dapat dihitung :

$$u_{*c}^2 = \frac{v^2}{\left(6 + 2.5 \ln \frac{h}{d(1 + 2\tau_*)}\right)^2}, \quad (4)$$

$$\tau_{*c} = \frac{u_{*c}^2}{sgd}, \quad (5)$$

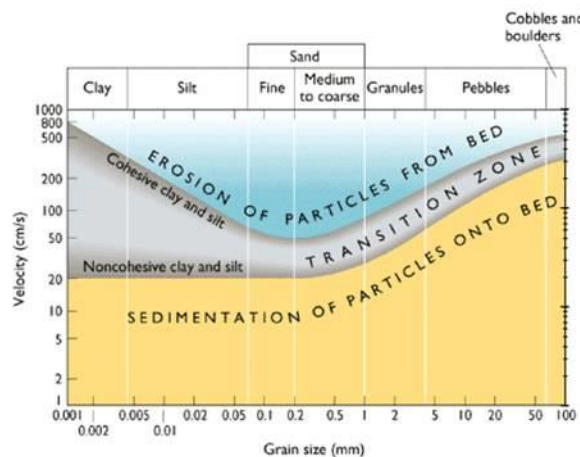
dimana  $\tau_*$  = tegangan geser ;  $\tau_{*c}$  = tegangan geser kritis ;  $u_{*c}$  = kecepatan geser kritis ;  $S_g$  = kemiringan sungai ;  $g$  = gravitasi ;  $d$  = diameter butir ;  $\gamma_b$  = berat jenis sedimen

Laju sedimen yang terjadi biasa dalam kondisi seimbang (*aquilibrium*). Erosi (*erosion*), atau pengendapan (*deposition*), maka dapat ditentukan kuantitas sedimen yang terangkut dalam proses tersebut.

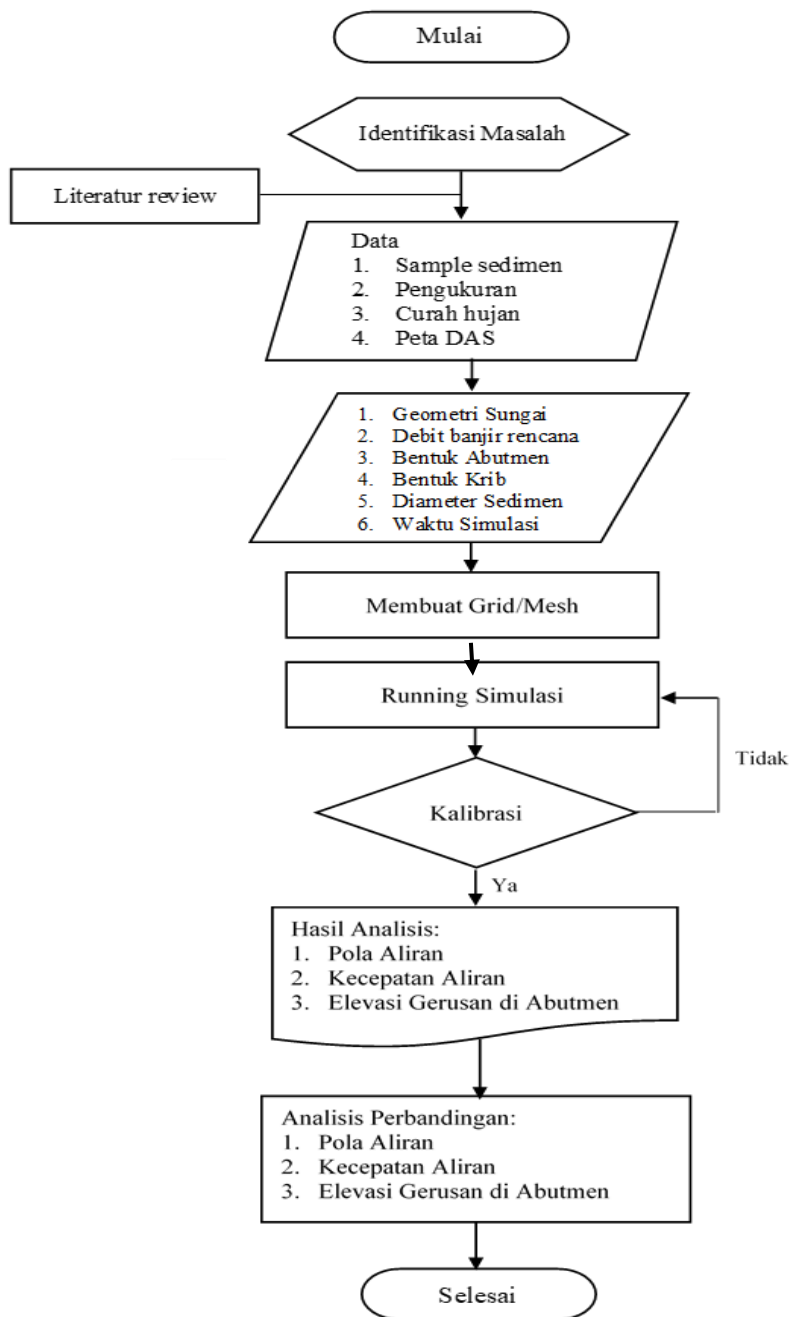
Tabel 1. Proses sedimen dasar

Perbandingan T	Proses yang terjadi	
	Sedimen	Dasar
T1=T2	Seimbang	Stabil
T1<T2	Erosi	Degradasi
T1>T2	Pengendapan	Agradasi

Kurva Hjulstrom salah satu analisis yang dapat dilakukan untuk mengetahui proses penggerusan sungai. Kurva tersebut akan menunjukkan kecepatan erosi pada suatu penampang tertentu. Kecepatan erosi (*Erosion Velocity*) adalah kecepatan terendah aliran sungai yang mampu mengangkut ukuran butir tertentu pada dasar sungai [15]. Kecepatan erosi rendah lebih dapat mengangkut partikel pasir daripada partikel berukuran debu atau kerikil. Hjulstrom diagram menunjukkan dua kurva pembagian. Kurva bagian atas yang berwarna biru mewakili kecepatan erosi (*Entrainment*) dalam satuan (cm/s) sebagai fungsi dari ukuran partikel di dalam (mm), sedangkan kurva bagian bawah yang berwarna cream menunjukkan kecepatan pengendapan sebagai fungsi dari ukuran partikel [16]. Sedangkan diantara kurva erosi dan kurva sedimentasi terdapat kurva berwarna abu-abu merupakan zona transisi dimana partikel tidak mengalami erosi maupun sedimentasi melainkan tetap tertransportasi di dalam suatu media.



Gambar 4. Diagram Hjulstrom

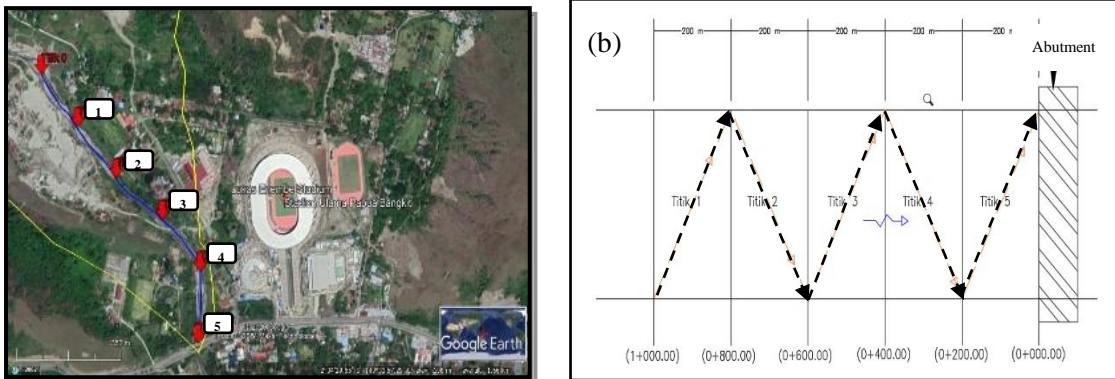


Gambar 6. Diagram alir penelitian

## Hasil dan Pembahasan

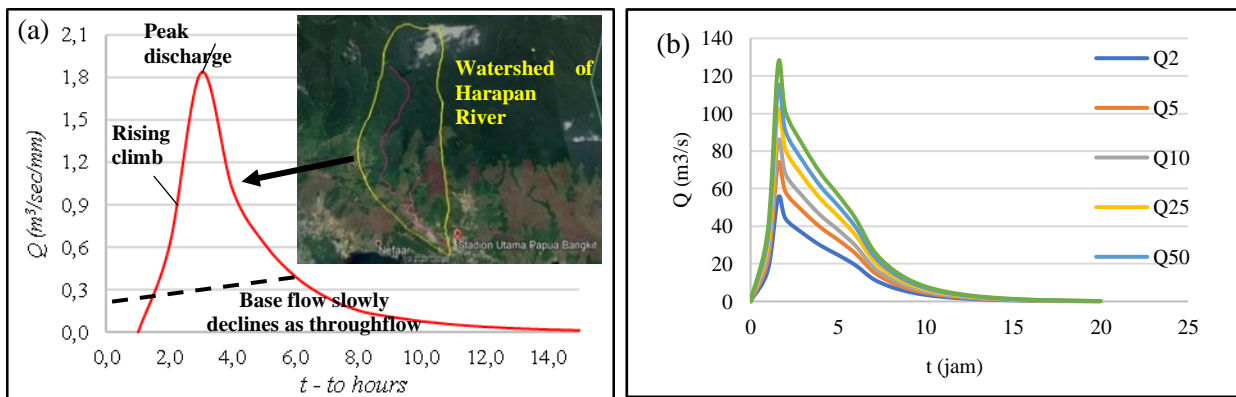
### Hidrologi dan Karakteristik Sedimen

Sungai Harapan menjadi salah satu tempat penambangan galian C bagi masyarakat sekitar (Gambar 7. a) dan hal ini akan mempengaruhi alur aliran serta sedimen yang terbawa dari hulu cenderung terdeposisi. Penambangan pasir juga berpengaruh terhadap melebarnya badan sungai dan menyebabkan pendangkalan pada titik titik tertentu yang digunakan untuk akses kendaraan [19]. Karakter fisik dari DAS, dengan luas adalah 18,88 km<sup>2</sup> dan panjang sungai adalah 9,07 km, dilakukan pengambilan sample sedimen secara *zigzag* sejauh 1 Km dari abutmen jembatan (Gambar 7. b).



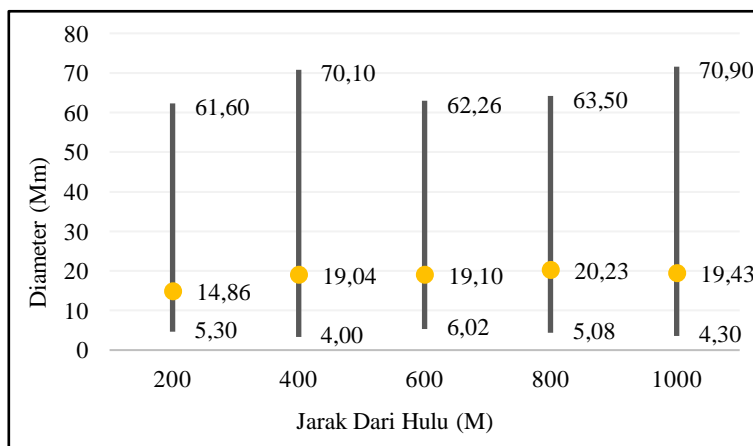
Gambar 7. (a) Situasi Sungai Harapan (b) Cara pengambilan sample material dasar

Analisis hidrograf berdasarkan pers 1, 2 dan 3, menunjukkan debit awal dan terkoreksi pada jam puncak sebesar  $1,838 \text{ m}^3/\text{s}/\text{mm}$  dan debit banjir rancang pada beberapa periode ulang berdasarkan hydrograph nakayasu dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Hidrograf banjir (a) kondisi eksisting dan (b) kondisi banjir rencana

Material dasar sangat mempengaruhi resistensi badan sungai terhadap tenaga aliran air yang dapat menggerus sungai. Semakin besar ukuran-ukuran butir maka semakin besar resistensi sungai terhadap gerusan. Material dasar mampu terangkut pada kecepatan aliran tertentu. Semakin tinggi kecepatan aliran maka semakin mudah material dasar terangkut. Hubungan tersebut dapat ditunjukkan dengan menggunakan Kurva Hjulstrom yang menggambarkan zonasi proses yang terjadi pada penampang sungai. Klasifikasi kriteria-kriteria kecepatan aliran dan besar material dasar pada Sungai Harapan dengan menggunakan metode klasifikasi *Sturgess*.



Gambar 9. Grafik ukuran diameter material dasar



Rata-rata diameter berkisar antara 14.858-20.231 mm jika diklasifikasikan menurut masuk dalam kategori kerikil sedang (*medium gravel*) sampai kerikil kasar (*coarse gravel*). Diameter ukuran butir secara keseluruhan menunjukkan bahwa. Rata-rata diameter memiliki ukuran yang hampir sama dikarenakan berada di lokasi yang sama dan karakteristik pengendapan yang hampir sama. Diameter butiran terkecil berkisar antara 4 – 6.02 mm. Diameter butiran terbesar berkisar 61.6 - 70.9 mm.

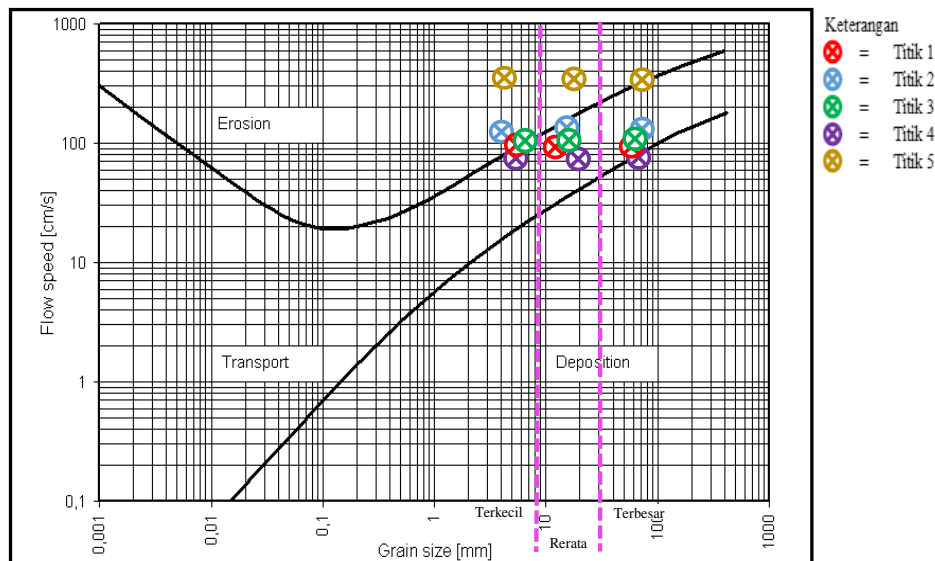
Tabel 2. Kriteria diameter butir rerata

Kriteria	Diameter butir rerata (mm)
Kecil	14.9-16.6
Sedang	16.7-18.4
Besar	18.5-20.2
Sangat Besar	>20.2

Tabel 3. Kriteria kecepatan aliran rerata

Kriteria	Kecepatan aliran rerata (cm/detik)
Rendah	77.6-160.6
Sedang	160.7-243.7
Tinggi	243.8-326.6
Sangat tinggi	>326.6

Proses transportasi terjadi akibat kecepatan aliran yang sedang sehingga material dapat bergerak menuju ke hilir. Lokasi 1 memiliki ukuran butir material dasar yang berukuran kecil yaitu 14.858 mm sehingga dengan kecepatan aliran yang tergolong rendah yaitu 99.066 cm/s sudah mampu mengangkat material dasar di lokasi tersebut. Sedangkan pada lokasi 2 dan 3 memiliki ukuran butir material dasar yang berukuran besar atau tergolong kerikil kasar (*Coarse Gravel*) dan memiliki kecepatan aliran yang tergolong rendah. Tetapi dengan kecepatan aliran tersebut material dasar sudah mampu terangkut. Pada titik 4 memiliki ukuran butir material dasar yang berukuran sangat besar yaitu 20.231 mm dan kecepatan aliran sebesar 77.558 cm/s. Pada kondisi ini material dasar sudah mampu terangkut tetapi belum sampai menggerus secara berkala. Pada lokasi ke 5 kecepatan aliran bertambah tinggi mencapai 352 cm/s dikarenakan lokasi ini berdekatan dengan belokkan sungai dan memiliki diameter butir material dasar sebesar 19.429 mm. Keadaan tersebut menunjukkan kecepatan rerata pada lokasi tersebut sudah mampu melakukan penggerusan secara terus menerus.

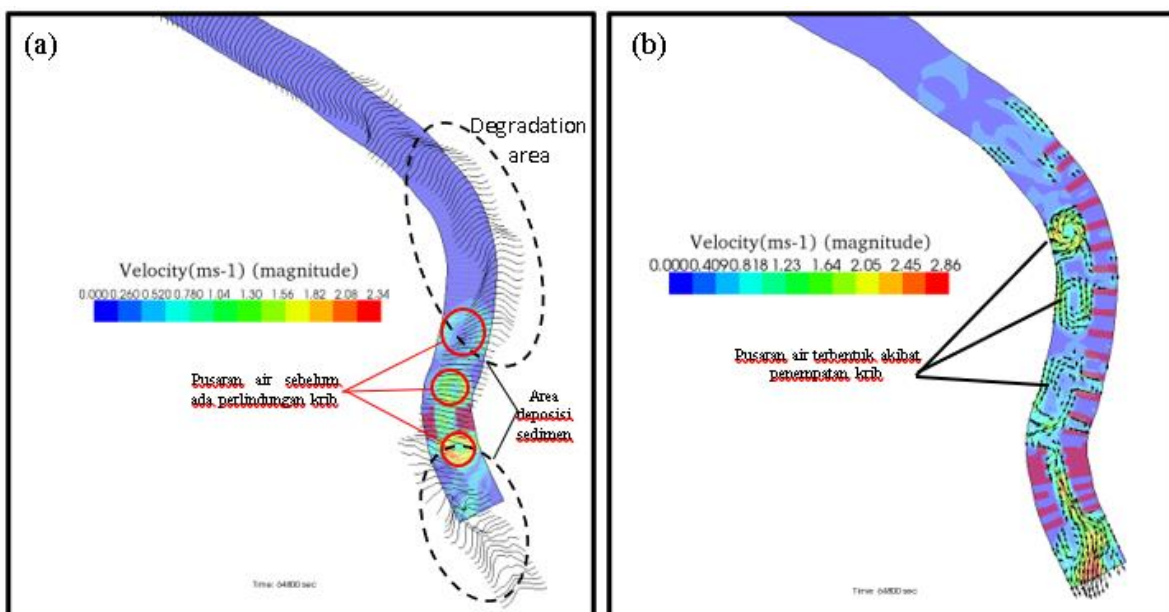


Gambar 10. Kurva Hjulstrom pada ukuran diameter terkecil, rerata dan terbesar

Pada kondisi diameter terkecil (4 – 6.02 mm) hampir semua lokasi berada di atas ambang kecepatan erosi dan hanya 1 yang melewati ambang kecepatan jatuh yaitu pada titik 4. Hal ini menyatakan bahwa pada kondisi diameter minimum material dasar sudah terangkut hingga tererosi pada kecepatan aliran yang sama. Pada kondisi diameter terbesar (61.6 – 70.9 mm) titik 1, 2 dan 3 mengalami zona transportasi. Kecepatan aliran pada titik ini masih mampu mengangkut material dasar dengan kondisi maksimum. Pada titik 4 dengan diameter 63.5 mm mengalami zona deposisi. Kondisi ini menunjukkan material dasar masuk dalam proses menetap (*settling*). Pada titik 5 masuk ke dalam zona erosi hal ini menjelaskan bahwa kecepatan aliran pada lokasi ini mampu mengangkut material tersebut walaupun pada ukuran butir maksimum yaitu 70.9 mm. Apabila terjadi peningkatan kecepatan aliran akibat banjir, maka setiap lokasi dapat masuk ke dalam zona erosi pada Kurva Hjulstrom dan terjadi penggerusan.

### Simulasi Komputasi

Kecepatan aliran dan bangunan air yang ada di sungai akan mempengaruhi gerakan sedimen dasar. Penempatan abutmen di belokan sungai berpotensi menambah kecepatan aliran dan membentuk aliran vortex di area tikungan sungai yang memungkinkan terjadi gerusan dan hasil gerusan akan terdeposisi pada pinggir luar badan sungai hingga ke area abutmen sehingga dapat menyebabkan keruntuhan abutmen (Gambar 11. a). Untuk meminimalisir hal tersebut maka penempatan krib akan membantu mengurangi kecepatan aliran di sepanjang tikungan sebelum dan sesudah abutmen (Gambar 11. b). Letak krib direncanakan tegak lurus aliran sungai dan alinyemen dibuat mengikuti garis horizontal longitudinal alur sungai. Pangkal krib diletakkan pada tebing untuk menghindari masuknya arus di belakang krib sehingga tebing lebih stabil dan tahan terhadap potensi longsoran. Menurut [20] (zulfan, 2019) kecepatan rata-rata aliran meningkat seiring dengan kenaikan debit sungai namun, dengan pemasangan krib kecepatan aliran di tikungan sungai dapat diredam dan dialihkan sehingga kecepatan di tikungan sungai menjadi lebih rendah serta terdistribusi dengan baik. Korelasi yang terjadi antara debit  $q$  ( $m^3/s/m$ ) dan kecepatan rata-rata  $v$  ( $m/s$ ) di area abutmen dapat dilihat pada Gambar 11.

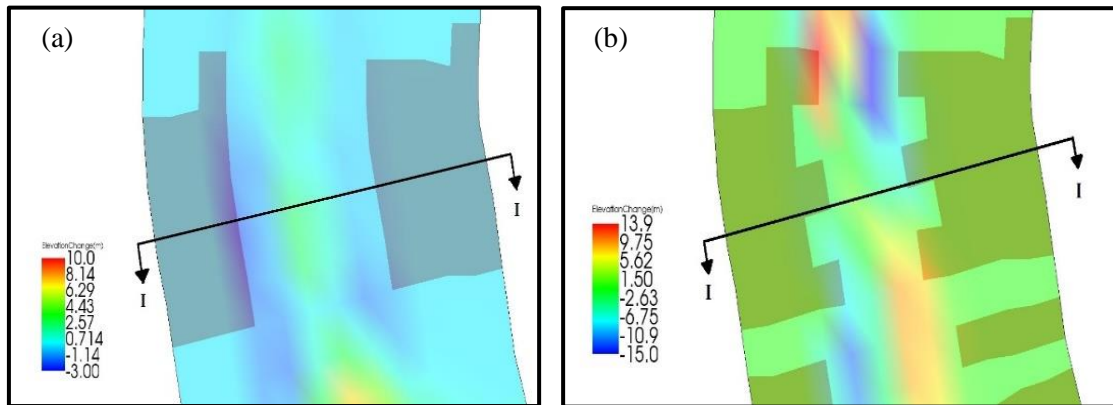


Gambar 11. Gerakan sedimen dasar dan perubahan pola aliran di abutmen (a) sebelum ada krib dan (b) setelah penempatan krib

Dari hasil running abutmen dengan pemasangan krib, terlihat perubahan besarnya kecepatan aliran disekitar abutmen akan berkurang dan aliran akan terdistribusi dengan baik dengan menghasilkan *vortex-vortex* yang lebih kecil dan terarah. Jika dibandingkan dengan kecepatan rata-rata pada sungai

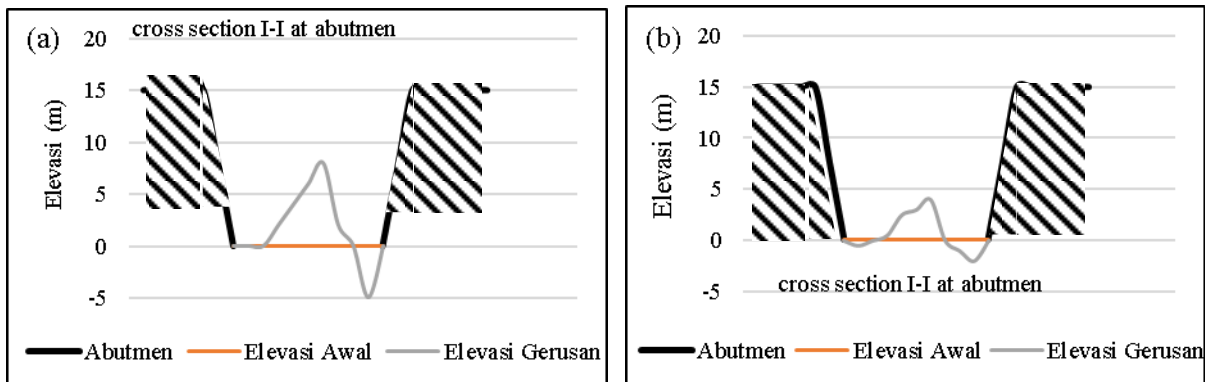
yang telah dipasang krib perubahan yang dihasilkan tidak berbeda jauh dari kecepatan kritis pada sungai. Kecepatan terendah di setiap debit kala ulang pada daerah krib sebesar 1,358 m/det dan kecepatan tertinggi di setiap kala ulang pada daerah krib sebesar 1,8335 m/det.

Air sebelum masuk ke abutmen mengalami turbulensi yang cukup besar dengan kecepatan hingga 1,33 m/det. Turbulensi ini tidak bersinggungan langsung dengan abutmen yang mengurangi risiko terjadinya gerusan di abutmen. Pada saat aliran air mulai memasuki abutmen arah kecepatan aliran tidak mengalami turbulensi dan saat aliran air keluar dari abutmen arah kecepatan dan kecepatan aliran sungai tetap stabil tanpa adanya turbulensi yang terjadi. Kecepatan aliran di sekitar abutmen tidak lebih dari 1,33 m/det.



Gambar 12. Pola perubahan elevasi dasar sungai di area abutmen (a) sebelum ada krib dan (b) setelah penempatan krib

Perbedaan gerusan yang terjadi terlihat pada letak daerah-daerah yang tergerus. Pada abutmen tanpa krib di setiap diameter butiran sedimen terjadi gerusan yang langsung bersinggungan dengan abutmen yang berada di sisi kanan. Gerusan yang terjadi cukup dalam hingga 5 m. Adapun agradasi yang terjadi di tengah-tengah antara kedua abutmen di setiap diameter butiran sedimen rata-rata di atas 3 meter hingga 7 meter. Sedangkan pada abutmen dengan krib, gerusan juga terjadi namun tidak bersinggungan langsung dengan kedua abutmen. Gerusan yang terjadi cukup kecil kecuali pada diameter butiran sedimen  $D_{50} \approx 1,54$  mm.



Gambar 13. Perubahan elevasi dasar area abutmen (a) sebelum ada krib dan (b) setelah penempatan krib

Seperti terlihat pada Gambar 13, Penempatan krib berhasil melindungi abutmen dari gerusan di struktur abutmen. Degradasi dasar saluran tetap terjadi setelah pemasangan krib, namun degradasi



tersebut tidak terjadi di struktur abutmen, krib mencegah dan melindungi abutmen agar dasar sungai tidak tergerus.

## Kesimpulan

Karakteristik butir material dasar pada Sungai Harapan masuk dalam kategori kerikil sedang (*medium gravel*) sampai kerikil kasar (*coarse gravel*) menurut *American Geophysical Union* dengan Rata-rata diameter berkisar antara 14.858 - 20.231 mm. Penempatan krib di area tikungan, sebelum dan sesudah abutmen akan mampu mengarahkan dan memperlambat kecepatan aliran sehingga perubahan kecepatan aliran disekitar abutmen akan berkurang dan aliran akan terdistribusi dengan baik dengan menghasilkan *vortex-vortex* yang lebih kecil dan terarah. Selain itu, krib dapat mengatur perubahan elevasi dasar sungai berupa aggradasi dan degradasi berdasarkan penempatan yang direncanakan dan krib akan melindungi abutmen dari risiko terjadinya gerusan di sekitar struktur abutmen.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. H. Hong, T. W. Sturm, and T. Stoesser, "Clear Water Abutment Scour in a Compound Channel for Extreme Hydrologic Events," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 141, no. 6, p. 04015005, 2015, doi: 10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001002.
- [2] A. A. Abdelaziz and S. Y. Lim, "Scour Hole Characteristics around Abutment in Compound Channel," *World Environ. Water Resour. Congr. 2017 Hydraul. Waterw. Water Distrib. Syst. Anal. - Sel. Pap. from World Environ. Water Resour. Congr. 2017*, no. 1961, pp. 389–401, 2017, doi: 10.1061/9780784480625.036.
- [3] A. Radice, F. Ballio, and G. Porta, "Local scour at a trapezoidal abutment: sediment motion pattern," *J. Hydraul. Res.*, vol. 47, no. 2, pp. 250–262, 2009, doi: 10.3826/jhr.2009.3356.
- [4] F. Ballio, A. Radice, and S. Dey, "Temporal Scales for Live-Bed Scour at Abutments," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 136, no. 7, pp. 395–402, 2010, doi: 10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000191.
- [5] H. Shahsavari, M. Heidarpour, and M. Mohammadalizadeh, "Simultaneous effect of collar and roughness on reducing and controlling the local scour around bridge abutment," *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun.*, vol. 65, no. 2, pp. 491–499, 2017, doi: 10.11118/actaun201765020491.
- [6] S. Ad, "Upaya Pengendalian Gerusan Di Sekitar Abutmen Jembatan," *Inf. dan Ekspose Has. Ris. Tek. Sipil dan Arsit.*, vol. 12, no. 1, pp. 70–77, 2016, doi: 10.21831/inersia.v12i1.10354.
- [7] F. Ballio, A. Teruzzi, and A. Radice, "Constriction Effects in Clear-Water Scour at Abutments," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 135, no. 2, pp. 140–145, 2009, doi: 10.1061/(asce)0733-9429(2009)135:2(140).
- [8] M. Koken and G. Constantinescu, "Flow and Turbulence Structure around Abutments with Sloped Sidewalls," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 140, no. 7, p. 04014031, 2014, doi: 10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000876.
- [9] V. Armenio, "Large Eddy Simulation in Hydraulic Engineering: Examples of Laboratory-Scale Numerical Experiments," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 143, no. 11, p. 03117007, 2017, doi: 10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001357.
- [10] J. H. Pu, A. Hussain, Y. kun Guo, N. Vardakastanis, P. R. Hanmaiahgari, and D. Lam, "Submerged flexible vegetation impact on open channel flow velocity distribution: An analytical modelling study on drag and friction," *Water Sci. Eng.*, vol. 12, no. 2, pp. 121–128, 2019, doi: 10.1016/j.wse.2019.06.003.
- [11] A. Radice and V. Davari, "Roughening Elements as Abutment Scour Countermeasures," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 140, no. 8, p. 06014014, 2014, doi: 10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000892.
- [12] I. Widyastuti, M. A. Thaha, R. T. Lopa, and M. P. Hatta, "Dam-Break Energy of Porous Structure for Scour Countermeasure at Bridge Abutment," *Civ. Eng. J.*, vol. 8, no. 12, pp. 3939–3951, 2022, doi: 10.28991/CEJ-2022-08-12-019.
- [13] V. T. Chow, *Hidrolika Saluran Terbuka (Open Channel Hydraulics)*. Jakarta: Erlangga., 1985th ed. Jakarta: Erlangga, 1997.



# KoNTekS17

Konferensi Nasional Teknik Sipil ke-17

- [14] D. S. Jiwaningrat Y. M, “Interaksi antara Karakteristik Aliran dan Material Dasar pada Proses Penggerusan Sungai Comal Pemalang, Jawa Tengah,” pp. 1–23, 2016.
- [15] L. W. D. Geier T.W, “To Aid in Securing Favorable Conditions of Water Flows Applied River Morphology,” no. October, 1996, [Online]. Available: <https://search.yahoo.com/search?fr=mcafee&type=E210US885G0&p=Gregory+S.+Bevenger+and+Rudy+M.+King%2C+1995%2C+A+Pebble+Count+Procedure+for+Assessing+Watershed+Cumulative+Effects>.
- [16] Y. Jiwaningrat and S. Dibiyosaputro, “Interaksi Antara Karakteristik Aliran Dan Material Dasar Pada Proses Penggerusan Sungai Sungai Comal Pemalang, Jawa Tengah.”
- [17] M. S. Ali, M. M. Hasan, and M. Haque, “Two-Dimensional Simulation of Flows in an Open Channel with Groin-Like Structures by iRIC Nays2DH,” *Math. Probl. Eng.*, vol. 2017, 2017, doi: 10.1155/2017/1275498.
- [18] Y. A. H. Takebayashi, “iRIC Software Nays2DH Solver Manual,” pp. 1–64, 2014.
- [19] R. Saputra, J. Ikhsan, J. Teknik, S. Universitas, M. Yogyakarta, and L. Belakang, “Pengaruh Penambanagn Pasir Terhadap Laju Degradasi Agradai Dasar Sungai Progo,” vol. 1, no. 2, pp. 109–120, 2021.
- [20] J. Zulfan, Y. Eka Kumala, and A. Dwi Astuti, “Efektivitas Krib Untuk Mengurangi Gerusan Di Tikungan Sungai Bengawan Solo,” *J. Tek. Hidraul.*, vol. 9, no. 2, 2019, doi: 10.32679/jth.v9i2.582.