



Analisis Kedalaman Gerusan Lokal (*Local Scouring*) Di Bagian Hilir Bendung Pada Model Tes Fisik Bendung Sei Ular

Stefani C. Maliangkay^{#a}, Liany A. Hendratta^{#b}, Jeffry S. F. Sumarauw^{#c}

[#]Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia

^astefanimaliangkay021@student.unsrat.ac.id, ^blianyhendratta@unsrat.ac.id, ^cjeffreysumarauw@unsrat.ac.id

Abstrak

Sungai memiliki peranan penting dalam ekosistem, irigasi pertanian, serta pengendalian banjir. Salah satu bangunan yang digunakan untuk mengelola aliran sungai adalah bendung, yang berfungsi untuk mengendalikan tinggi muka air dan mengalirkan air ke saluran irigasi. Bendung Sei Ular di Sumatera Utara merupakan salah satu bendung yang dibangun untuk mengatasi penurunan muka air sungai akibat degradasi dasar sungai. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kedalaman gerusan lokal (*local scouring*) di bagian hilir Bendung Sei Ular menggunakan model tes fisik. Penelitian ini dilakukan untuk memahami pola gerusan lokal dan kedalamannya pada kondisi debit yang berbeda, serta untuk membandingkan hasil pengukuran gerusan dengan tiga metode empiris, yaitu *Lacey*, *Wu*, dan *Veronesse*. Model tes fisik dilakukan di Laboratorium Hidraulik Balai Teknik Irigasi Bekasi, dengan dua variasi debit aliran, yaitu Q_{50} dan Q_{100} . Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedalaman gerusan lokal meningkat seiring dengan meningkatnya debit aliran, di mana kedalaman gerusan untuk debit Q_{50} adalah 0,30 m dan untuk Q_{100} adalah 0,35 m. Metode *Veronesse* menghasilkan perhitungan kedalaman gerusan yang paling mendekati hasil pengamatan fisik, dengan kesalahan relatif sebesar 12,03%. Penelitian ini memberikan informasi yang berguna untuk desain rehabilitasi dan modernisasi Bendung Sei Ular, serta dapat menjadi acuan dalam mitigasi potensi gerusan yang berisiko terhadap stabilitas bendung.

Kata kunci: Gerusan lokal, Metode Lacey, Metode Veronesse, Metode Wu, Model Tes Fisik

1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Bendung terdiri dari dua jenis, yaitu bendung tetap dan bendung gerak, yang masing-masing memiliki peran dalam pengaturan muka air sesuai kebutuhan. Salah satu bendung besar di Sumatera Utara adalah Bendung Sei Ular yang terletak di Dusun I, Desa Pulau Tagor, yang sejak dibangun pada tahun 2010 telah mengairi lahan pertanian seluas 18.500 hektare, menggantikan fungsi pengambilan bebas yang sudah tidak lagi efektif akibat penurunan dasar sungai.

Bendung Sei Ular saat ini tengah mengalami rehabilitasi dan modernisasi untuk mengatasi degradasi dasar sungai yang memengaruhi kinerjanya. Untuk menunjang proses perbaikan ini, dilakukan uji model hidraulik fisik guna memahami karakteristik aliran, termasuk fenomena gerusan (*scouring*) di bagian hilir akibat loncatan hidraulik dari perubahan aliran superkritis ke subkritis. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh parameter aliran dari model fisik yang dapat diskalakan menjadi nilai prototipe serta mengkaji kedalaman gerusan yang terjadi di hilir bendung, sehingga hasilnya dapat menjadi indikator dalam menilai kinerja hidraulik Bendung Sei Ular secara lebih akurat.

1.2. Rumusan Masalah

Tingginya intensitas curah hujan beberapa kali memicu terjadinya banjir pada Sungai Tougela. Maka perlu dilakukan analisis terhadap besarnya debit banjir dan elevasi tinggi muka air serta tahapan pengendalian banjir perlu dilakukan.

1.3. Batasan Penelitian

1. Pengujian ini dilakukan berskala menggunakan model tes fisik di laboratorium hidraulik.
2. Debit yang digunakan menggunakan debit Q_{50} , Q_{100} .
3. Dalam penelitian ini hanya untuk melihat pola gerusan yang terjadi dan kedalaman gerusan yang terjadi di bagian hilir bendung.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis pola gerusan lokal yang terjadi pada bagian hilir bendung pada berbagai kondisi debit, mengetahui kedalaman gerusan lokal yang terbentuk, serta membandingkan hasil gerusan lokal tersebut dengan menggunakan metode Lacey, Wu, dan Veronese.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai indikator dalam perencanaan Bendung Sei Ular guna memperoleh hasil yang lebih efektif dan efisien, sebagai kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan di bidang hidraulika khususnya terkait gerusan di bagian hilir bendung, serta sebagai sumber informasi yang dapat dimanfaatkan dalam penelitian-penelitian selanjutnya.

1.6. Lokasi Penelitian

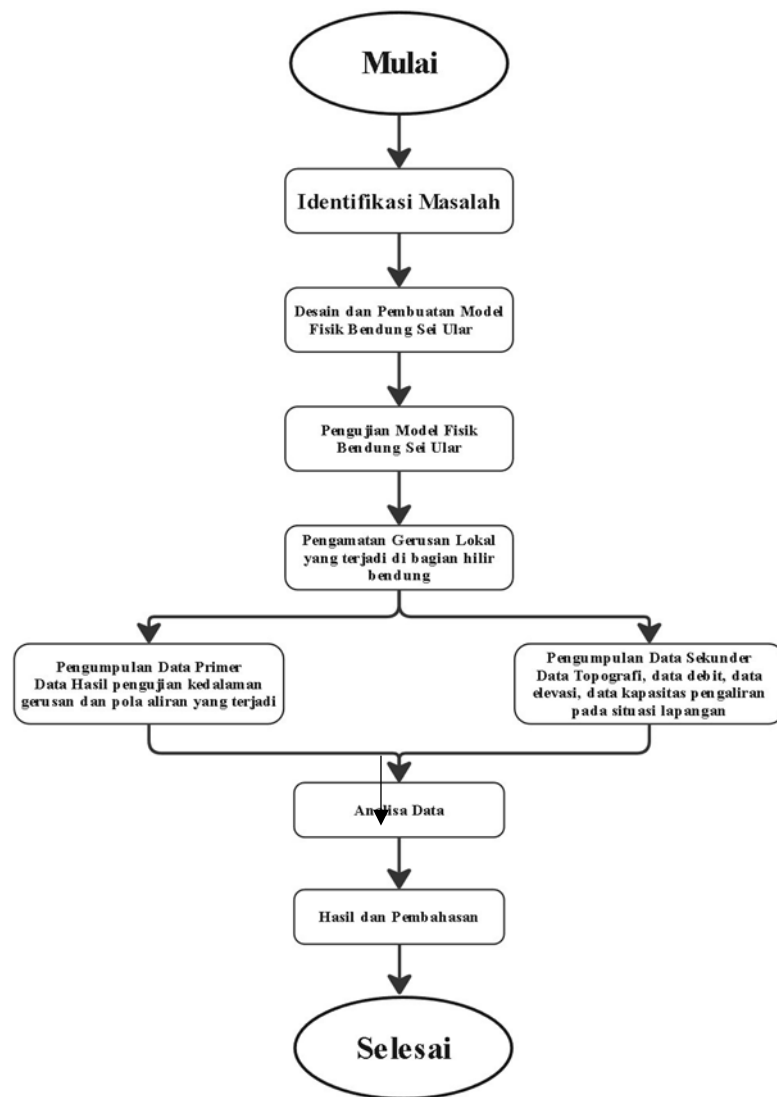
Lokasi penelitian dilakukan di laboratorium hidraulik. Balai Teknik Irigasi, Bekasi dengan lokasi koordinat $6^{\circ} 15' 23.86''$ S, $107^{\circ} 0' 18.14''$ E. Laboratorium ini merupakan laboratorium pengujian model tes fisik yang digunakan Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Sumber Daya Air.



Gambar 1. Lokasi Penelitian (Google Earth)

2. Tahap Penelitian

Tahap penelitian digambarkan dalam alur yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Bagan Alir Penelitian

3. Kajian Literatur

3.1. Bendung

Bendung menjadi bangunan melintang sungai yang dibangun untuk meninggikan tinggi muka air sungai atau membendung aliran sungai agar bisa dialirkan secara gravitasi berdasarkan elevasi yang ada ke daerah yang membutuhkan dengan menyadap sungai sehingga air bisa dialirkan ke saluran melalui bangunan pengambilan (*intake*). (Mangore & E. M. Wuisan, 2013).

3.2. Model Fisik Hidraulik

Model fisik hidraulik adalah peniruan bangunan air yang telah direncanakan sebelum diwujudkan pada benda aslinya, atau suatu model miniatur skala tertentu, dengan memperhatikan prinsip kesebangunan dan hubungan antar skala parameter yang harus dipenuhi.

3.3. Loncatan Hidraulik

Loncatan hidrolik terjadi ketika aliran air mengalami perubahan mendadak dari kondisi superkritis (kecepatan tinggi) ke kondisi subkritis (kecepatan rendah) kondisi ini disebut kondisi *Abrupt Rise*. (Mulyawati, Dermawan, & Cahya, 2023).

3.4. Gerusan

Gerusan lokal (*local scouring*) merupakan proses erosi yang terjadi di sekitar suatu area tertentu pada dasar sungai akibat ketidakseimbangan antara jumlah sedimen yang terangkut oleh aliran dan jumlah sedimen yang disuplai ke lokasi tersebut. (Graf & Altinakar, 1998).

3.5. Pola Aliran

Karakteristik pola aliran di sekitar abutmen menunjukkan adanya percepatan aliran di bagian hulu abutmen, yang kemudian melambat atau melemah saat mendekati struktur. Proses ini mengakibatkan pemisahan aliran yang dipengaruhi oleh sistem pusaran (*vortex*). (Halim & Hendratta, 2018).

3.6. Aliran Air Pada Bendung

Aliran air dalam suatu saluran dapat dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu aliran pada saluran dengan muka air bebas dan aliran dalam pipa tertutup. Aliran pada saluran dengan muka air bebas ditandai dengan keberadaan permukaan air yang langsung berhubungan dengan atmosfer, sehingga tekanan pada permukaan air tersebut sama dengan tekanan atmosfer. (Halim & Hendratta, 2018).

3.7. Klasifikasi Aliran

Klasifikasi aliran pada saluran terbuka dapat dibedakan dengan bilangan *froude* dan dipengaruhi gaya tarik bumi. Adapun klasifikasi aliran berdasarkan fungsi bilangan *froude* dan dipengaruhi gaya tarik bumi, yaitu sebagai berikut:

1. Aliran sub kritis, jika bilangan *froude* lebih kecil dari satu ($Fr < 1$),
2. Aliran kritis, jika bilangan *froude* sama dengan satu ($Fr = 1$)
3. Aliran super kritis, jika bilangan *froude* lebih besar dari satu ($Fr > 1$),. (Halim & Hendratta, 2018).

3.8. Bilangan Froude

Berdasarkan pengaruh gaya tarik bumi aliran dibedakan menjadi aliran sub kritis, kritis, dan super kritis. (Kuncoro, 2021). Penentuan keadaan aliran dapat dilihat dari bilangan *froude* yang ditentukan sebagai berikut :

$$FR = \frac{v}{\sqrt{g \times y}} \quad (1)$$

Dimana :

Fr = bilangan *froude*.

V = kecepatan aliran (m/det).

g = percepatan gravitasi (9,8 m/det²).

Y = kedalaman aliran (m).

Nilai kecepatan (V) diperoleh dengan rumus:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

Dimana :

V = Kecepatan aliran (m/det).

Q = Debit aliran (m³ /det).

A = Luas Saluran (m²).

Nilai luas saluran (A) diperoleh dengan rumus :

$$A = b \times H \quad (3)$$

Dimana :

A = Luas saluran (m²).

b = Lebar saluran (m).

H = Tinggi saluran (m).

3.9 Debit Aliran

Debit atau besarnya aliran sungai (*stream flow*) adalah volume aliran yang mengalir melalui suatu penampang melintang sungai persatuan waktu. Dalam satuan SI besarnya debit dinyatakan dalam satuan meter kubik per detik (m^3/det) atau liter per detik (ℓ/det) (Kuncoro, 2021). Rumus umum yang digunakan untuk mengukur debit adalah :

$$Q = V.A \quad (4)$$

Dimana:

Q = Debit (m^3/det).

V = Kecepatan aliran rata-rata (m/det).

A = Luas penampang melintang saluran (m^2).

3.10 Metode Analisis

Dalam menganalisis kedalaman gerusan lokal pada bagian hilir bendung digunakan 3 metode yang sering di sebut dengan metode empiris. Adapun ketiga metode empiris tersebut yaitu:

Metode Lacey

$$R = 0,47 \left(\frac{Q}{F} \right)^{1/3} \quad (5)$$

Dimana :

R = Kedalaman gerusan (m).

Q = Debit aliran (m^3/det).

F = Faktor lumpur *Lacey* = 1,76 (Dm) 0,5.

Dm = Diameter rata-rata materi (mm).

Metode Wu

$$ds = 1,18 \times H^{0,235} \times Q^{0,51} \quad (6)$$

Dimana :

ds = Kedalaman gerusan (m).

H = Perbedaan tinggi muka air di hilir saluran (m).

g = Percepatan gravitasi (m/det^2).

q = Debit aliran persatuan lebar saluran ($\text{m}^3/\text{det}^2/\text{m}$).

Metode Veronesse

$$ds = 1,90 \times H^{0,225} \times Q^{0,54} \quad (7)$$

Dimana :

ds = Kedalaman gerusan (m).

H = Perbedaan tinggi muka air di hilir saluran (m).

q = Debit aliran persatuan lebar saluran ($\text{m}^3/\text{det}/\text{m}$).

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Penentuan Skala Model

Penskalaan model adalah penskalaan nilai-nilai di prototipe menjadi nilai-nilai di model yang dilakukan berdasarkan kriteria bilangan *froude*, $Fr = v/(gh)^{1/2}$, yaitu bilangan *froude* di model sama dengan bilangan *froude* di prototipe, atau $Fr_m = Fr_p$. Penskalaan menggunakan skala model 1 : n atau 1/n, dimana n adalah faktor skala yang didefinisikan sebagai nilai di prototipe dibagi nilai di model.

$$N = \frac{\text{nilai di prototipe}}{\text{nilai di model}}$$

Penggunaan skala model 1 : 40 ini dilakukan dengan pertimbangan bahwa pemodelan Bendung Sei Ular harus menggunakan area pengujian di luar ruangan (outdoor) yang lebih besar karena area pengujian di dalam ruangan (indoor) terlalu kecil. Dengan skala model 1 : 40, maka besar faktor skala parameter-parameter hidraulik terkait diberikan seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Besar Faktor Skala Parameter-Parameter Hidraulik

No.	Parameter		Formula Faktor	Nilai Faktor
	Nama	Notasi	Skala	Skala
1	Tinggi, kedalaman	h	n_h	40,00
2	Panjang, lebar	L	$n_L = n_h$	40,00
3	Kecepatan aliran	v	$n_v = n_h^{1/2}$	6,325
4	Waktu aliran	t	$n_t = n_h^{1/2}$	6,325
5	Debit	Q	$n_Q = n_h^{5/2}$	10.119,286
6	Luas	A	$n_A = n_h^{-2}$	1.600,000
7	Volume	V	$n_V = n_h^3$	64.000,000
8	Percepatan gravitasi	g	$n_g = 1$	1

4.2 Debit Pengaliran

Bangunan ukur debit tipe *rechbock* digunakan sebagai alat ukur debit untuk mengendalikan secara bersama-sama dengan pintu pengatur *spillout* supaya dapat diperoleh debit ke daerah tampungan model tes fisik sama dengan debit *outflow* rencana pengujian.

$$Q = (0.6257x^{-0.039}) \frac{2}{3} \sqrt{2g} h_{ie}^{\frac{3}{2}}$$

Keterangan:

Q = Debit aliran (m³/det).

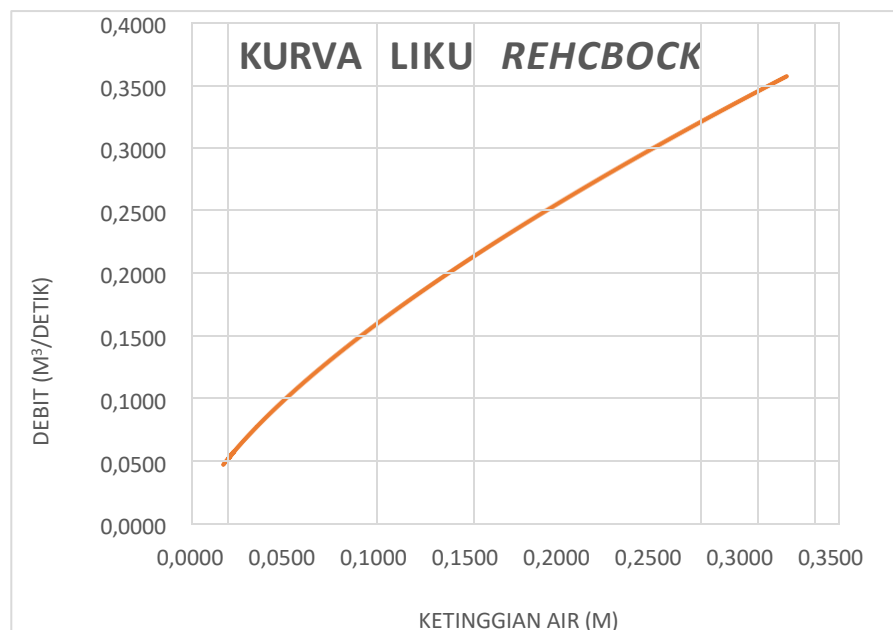
x = Parameter tertentu (terkait dengan koefisien).

g = Percepatan gravitasi.

h_{ie} = Tinggi energi (m).

0,6257 = Koefisien empiris.

Kurva liku debit *Rechbock* dapat dilihat pada gambar berikut.

**Gambar 3.** Kurva Liku Debit

4.2.1 Analisa Debit

Dalam penelitian ini debit yang akan digunakan dalam perhitungan kedalaman gerusan adalah debit prototipe Q_{50} dan Q_{100} . Dari data tersebut maka dapat tabel debit rencana dan tinggi muka air di atas ambang terlihat di Tabel 2.

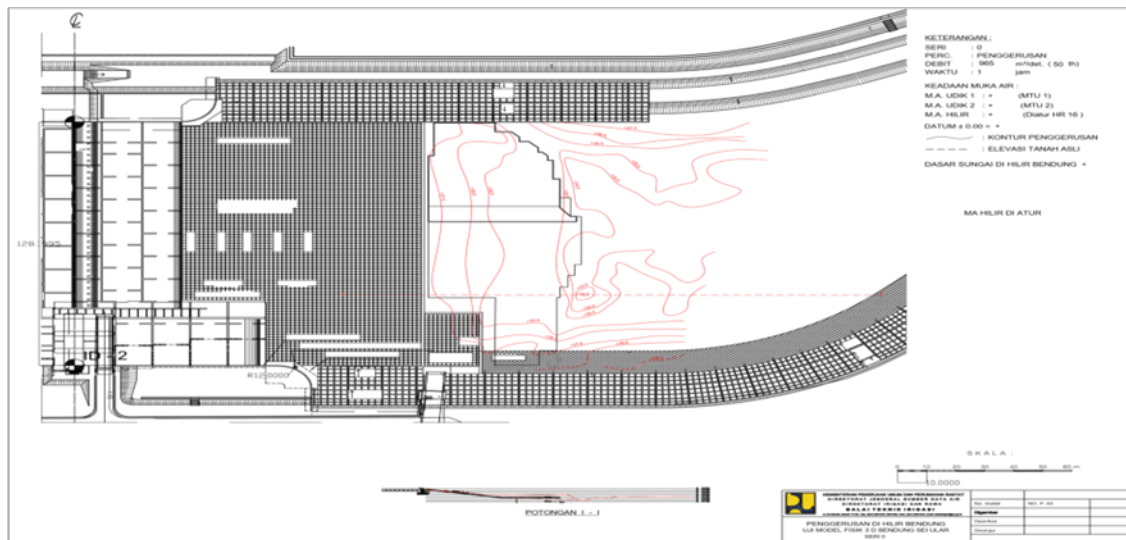
Tabel 2. Tinggi Muka Air Di Atas Ambang *Rechbock*

No.	Periode	Debit Prototipe	Model 1:40		<i>Rechbock</i>	Muka Air	
		m ³ /det	l/det	h (cm)	Bacaan	Disetel	Bacaan
1	Q ₅₀	965	95,362	15,96	36,9	41,96	130,8
2	Q ₁₀₀	1.125	111,174	17,63	34,3	42,46	129,55

Sumber : Balai Teknik Irigasi, Lab Hidraulik

4.3 Pengamatan Pola Gerusan Lokal di Hilir Bendung

Berdasarkan pengujian gerusan model tes fisik Bendung Sei Ular pada bagian hilir bendung, gerusan mulai terjadi pada bagian concreat matrass dan mulai terlihat dalam pada bagian hilir concreat matrass dengan kedalaman berbeda sesuai dengan besar aliran debit yang dialiri. Pola gerusan yang terjadi bisa dilihat pada Gambar 4, yakni pola gerusan di bagian hilir bendung dengan aliran debit $Q_{50} = 965 \text{ m}^3/\text{det}$, dengan waktu pengujian selama 60 menit.

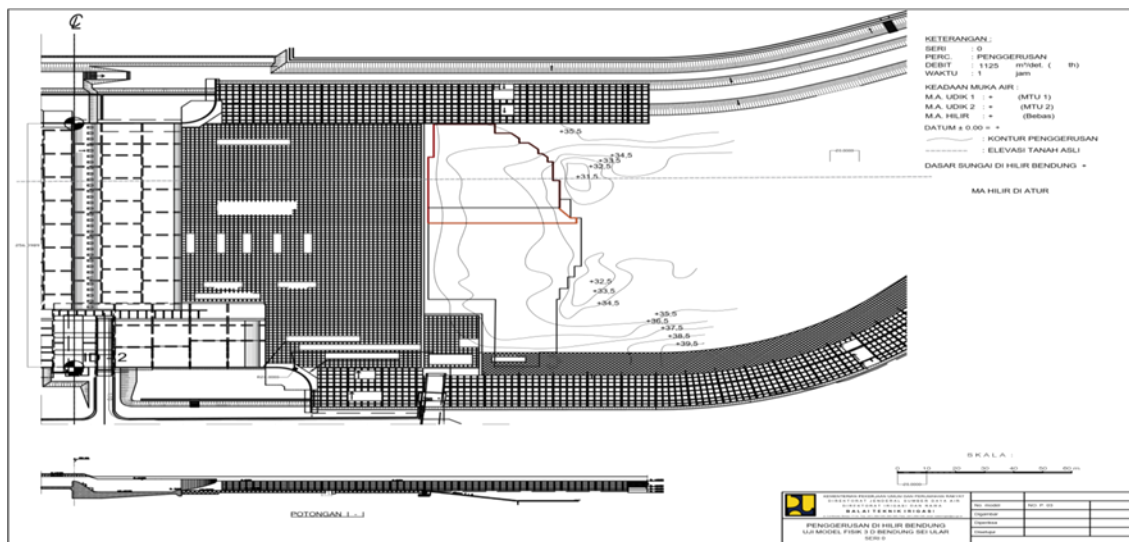


Gambar 4. Pola Gerusan Di Bagian Hilir Pada Debit Prototipe Q_{50}

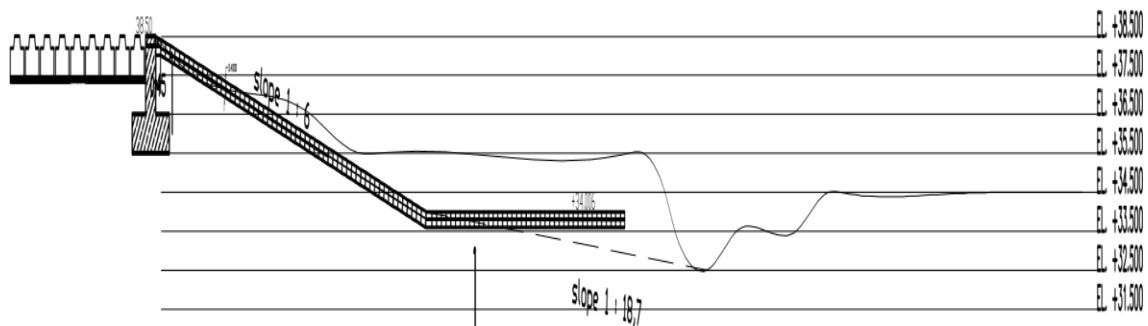
Pola gerusan di bagian hilir bendung dengan aliran debit $Q_{100} = 1.125 \text{ m}^3/\text{det}$, dengan waktu pengujian selama 60 menit dapat dilihat pada Gambar 5.

4.4 Data Gerusan Lokal pada Model Tes Fisik Bendung Sei Ular

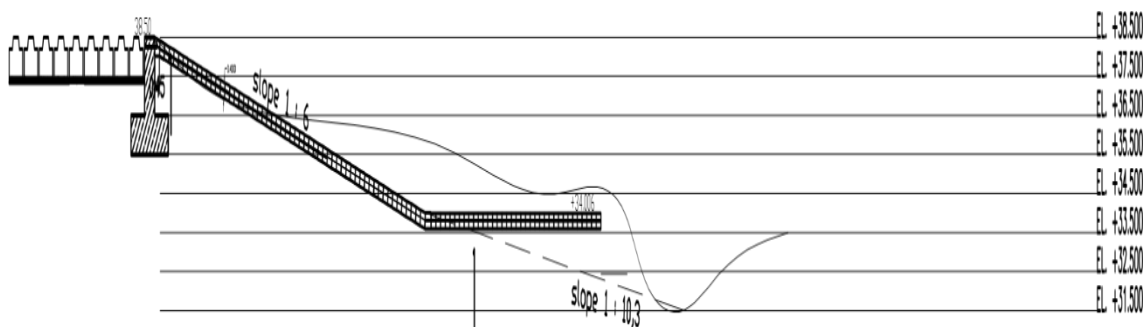
Pengaliran yang dilakukan terhadap debit Q_{50} berdurasi 60 menit, dengan kondisi gerusan bisa dilihat pada Gambar 6 dan untuk gerusan dengan debit Q_{100} dengan berdurasi 60 menit di lihat pada Gambar 7. Dari hasil pengukuran kedalam didapat kedalam gerusan lokal terdalam pada debit Q_{50} berada pada elevasi +32,0 dan pada debit Q_{100} berada di evelasi +31,5 bisa dilihat pada Gambar 8.



Gambar 5. Pola Gerusan Di Bagian Hilir Pada Debit Prototipe Q_{100}



Gambar 6. Potongan Memanjang Gerusan Terdalam Pada Debit Q_{50}



Gambar 7. Potongan Memanjang Gerusan Terdalam Pada Debit Q_{100}

4.5 Perhitungan Kedalaman Gerusan Lokal Dengan Menggunakan Metode Empiris

Dari data hasil uji pola gerusan di bagian hilir bendung dan hasil kedalaman gerusan lokal yang terjadi di bagian hilir bendung yang terjadi kemudian dilakukan analisis data dengan menggunakan data hasil pengujian dan pengukuran secara langsung.

1. Perhitungan gerusan lokal di bagian hilir bendung pada percobaan dengan debit Q_{50} .

a. Metode Lacey

$$F = 1,76 D^{0,5} = 1,244 \text{ m}^3/\text{det}$$

$$Q = 0,095 \text{ m}^3/\text{det}$$

$$R = 0,47 \left(\frac{Q}{F} \right)^{1/3} = 0,199 \text{ m}$$

b. Metode Wu

$$q = \frac{Q}{b} = 0,0296 \text{ m}^3/\text{det}$$

$$H = \text{elevasi muka air di hulu} - \text{elevasi muka air di hilir} = 2,6\text{m}$$

$$ds = 1,18 \times H^{0,235} \times q^{0,51} = 0,245\text{m}$$

c. Metode *Veronesse*

$$q = \frac{Q}{b} = 0,0296 \text{ m}^3/\text{det}$$

$$H = \text{elevasi muka air di hulu} - \text{elevasi muka air di hilir}$$

$$ds = 1,90 \times H^{0,225} \times q^{0,54} = 0,35\text{m}$$

2. Perhitungan gerusan lokal di bagian hilir bendung pada percobaan dengan debit Q_{100} .

a. Metode *Lacey*

$$F = 1,76 D^{0,5} = 1,244 \text{ m}^3/\text{det}$$

$$Q = 0,111 \text{ m}^3/\text{det}$$

$$R = 0,47 \left(\frac{Q}{F} \right)^{1/3} = 0,210\text{m}$$

b. Metode *Wu*

$$q = \frac{Q}{b} = 0,0346 \text{ m}^3/\text{det}$$

$$H = \text{elevasi muka air di hulu} - \text{elevasi muka air di hilir} = 2,8\text{m}$$

$$ds = 1,18 \times H^{0,235} \times q^{0,51} = 0,270\text{m}$$

c. Metode *Veronesse*

$$q = \frac{Q}{b} = 0,0364 \text{ m}^3/\text{det}$$

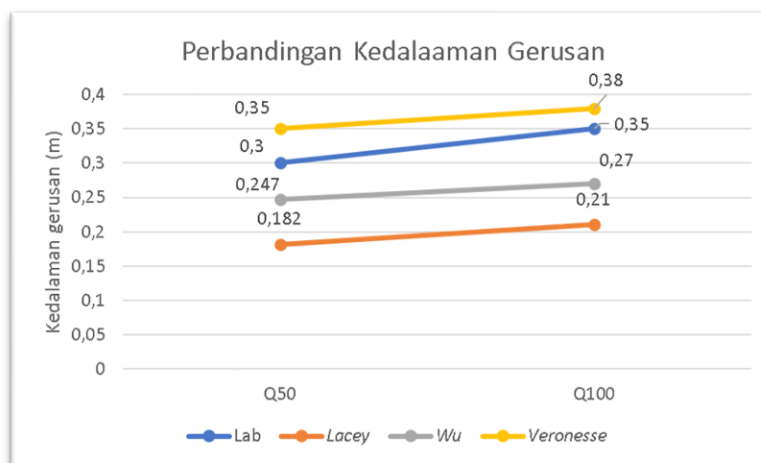
$$H = \text{elevasi muka air di hulu} - \text{elevasi muka air di hilir}$$

$$ds = 1,90 \times H^{0,225} \times q^{0,54} = 0,38\text{m}$$

Berikut ini merupakan tabel hasil perhitungan perbandingan nilai kedalaman gerusan hasil penelitian laboratorium dengan nilai kedalaman gerusan perhitungan menggunakan metode *Lacey*, *Wu* dan *Veronesse* pada bagian hilir bendung.

Tabel 3. Rekapitulasi Hasil Perhitungan Kedalaman Gerusan

No.	Kala Ulang (Tahun)	Debit (m ³ /det)	Kedalaman Gerusan dalam Penelitian (m)	<i>Lacey</i> (m)	<i>Wu</i> (m)	<i>Veronesse</i> (m)
1.	50	0,95	0,30	0,182	0,247	0,35
2.	100	0,111	0,35	0,210	0,270	0,38



Gambar 8. Grafik Perbandingan Nilai Kedalaman Gerusan Di Bagian Hilir Bendung

Dari data penelitian di atas perhitungan kedalaman gerusan menggunakan 3 (tiga) metode empiris menghasilkan hasil yang berbeda-beda. Dimana hasil perhitungan yang mendekati atau sama dengan hasil pengukuran di laboratorium adalah metode *Veronesse* dengan kesalahan relatif $Q_{50} = 16,66\%$ dan untuk $Q_{100} = 8,57\%$.

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengamatan dan pengukuran kedalaman gerusan lokal di bagian hilir bendung melalui model tes fisik Bendung Sei Ular pada seri 0 dengan debit Q50 dan Q100, ditemukan bahwa pola dan posisi gerusan berbeda, di mana semakin besar debit yang dialirkan, maka semakin dalam gerusan yang terjadi serta memengaruhi pola aliran di hilir bendung. Kedalaman gerusan terdalam untuk debit Q50 ($965 \text{ m}^3/\text{det}$) tercatat pada elevasi +32,5 dengan kedalaman 0,30 m, sedangkan untuk Q100 ($1.125 \text{ m}^3/\text{det}$) berada pada elevasi +31,5 dengan kedalaman 0,35 m. Perbandingan hasil perhitungan menggunakan metode Lacey, Wu, dan Veronesse menunjukkan bahwa ketiganya menghasilkan nilai yang berbeda, dengan kesalahan relatif masing-masing sebesar 39,6% untuk metode Lacey, 20,4% untuk metode Wu, dan 12,3% untuk metode Veronesse. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa metode Veronesse merupakan metode yang paling mendekati hasil pengamatan pada model fisik, karena memiliki tingkat kesalahan relatif paling kecil sebesar 12,3%.

5.2 Saran

Penelitian ini sebaiknya percobaannya dilakukan dengan waktu yang lebih lama agar mendapat data gerusan yang lebih valid. Saat sebelum memulai penelitian ini harusnya dapat lebih mempelajari dan mengikuti perhitungan debit untuk prototipe agar bisa mengetahui perhitungan debit prototipe sebelum nantinya terkalibrasi dengan skala yang akan digunakan.

Referensi

- Aprilianti, S. (2022). Karakteristik Aliran Pada Saluran Terbuka Dengan Variasi Ambang Dan Permukaan Dasar Saluran Berdasarkan Uji Laboratorium . *Doctoral Dissertation, Universitas Tanjungpura*.
- Cambodia, M. (2020). Analisis Gerusan Lokal Pada Pilar Jembatan Kereta Api BH. 337 Akibat Aliran Sungai Cikao. *Teknika Sains*.
- Direktorat Jendral Sumber Daya Air. (2013). Kriteria perencanaan bagian bangunan utama (Head Works) KP-02. *Kementerian Pekerjaan Umum, Direktorat Irigasi dan Rawa*.
- Graf, W., & Altinakar, M. (1998). Fluvial Hydraulics. *John Wiley & Sons*.
- Halim, S. M., & Hendratta, L. A. (2018). Analisis gerusan lokal pada pilar jembatan Kuwil Kabupaten Minahasa Utara menggunakan metode empiris. *Jurnal Sipil Statik*, 6(11), 1017-1028.
- Hendratta, L. A., Thambas, A., Manu, L., & Monica, L. (2024). Pengaruh Aliran Sungai Panasen Terhadap Proses Sedimentasi di Danau Tondano. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Warmadewa*, 13(2), 131-137. <https://doi.org/pd.22225/pd.13.2.10720.131-137>
- Hendratta, L. A., Laurentia, S. C., KOH, D. K., Monica, L., & Ratu, Y. A. (2024). Sedimentation Analysis Study in Lake Tondano Due to the Development of the Surrounding Area. *Environment and Ecology Research*, Vol 12, No. 5, pp 480-491, 2024. DOI: 10.13189/eer.2024.120502
- Hendratta, L. A., Laurentia, S. C., KOH, D., Manganka, I., Thambas, A., Sumanti, F., & Monica, L. (2024). Tondano Lake Managment - Environmental Issues and Integrated Counter Measurements. *Environment and Ecology Research*, 12(5), 480 -491. DOI: 10.13189/eer.2024.120502
- Kuncoro, W. (2021). Analisis kedalaman gerusan lokal (local scouring) di hilir bangunan pelimpah (stepped modified spillway) dengan model fisik 2D. *Skripsi, Universitas Lampung*.
- Laursen, E., & Toch. (1956). Scour Around Bridge Piers and Abutments. *Iowa Highway Research Board (Buletin No.4 , halaman 60)*.
- Mangore, V. R., & E. M. Wuisan, L. T. (2013). PERENCANAAN BENDUNG UNTUK DAERAH IRIGASI SULU. *Jurnal Sipil Statik*.
- Mawardi, E., & Memed, M. (2006). *Desain Hidraulik Bendung Tetap untuk Irigasi Teknik*.
- Monica, L., Hendratta, L. A., & Manopo, M. R. (2024). Laju Erosi dan Potensi Sedimen DTA Danau Tondano. *Jurnal Teknik Sipil Terapan*.
- Mulyawati, E., Dermawan, V., & Cahya, E. (2023). Studi Pola Gerusan di hilir Bendung Alale Kabupaten Boen Bolango Provinsi Gorontalo.
- Pramadhani, M., Rizal, N., & Priyono, P. (2023). Pemodelan hidrolik aliran pada bendung dengan mercu tipe ogee. *Jurnal Smart Teknologi*, 4(4), 412-429.
- Raju, R. (1986). *Air Melalui Saluran Terbuka*. Erlangga.
- Wuisan, M., & Tangkudung, H. (2013). *Perencanaan Bendung Untuk Daerah Irigasi Sulu*.