
Analisis Gerusan Lokal dengan Metode Colorado State University (CSU) Dan Metode Froehlich

Cut Suciatina Silvia*¹, Azwanda²

^{1,2}Universitas Teuku Umar, Alue Peunyareng, Meulaboh, Aceh Barat 23615, PO BOX 59

e-mail: *coetsilvia@utu.ac.id, azwanda@utu.ac.id

Abstrak

Jembatan Alue Buloh yang melintasi Sungai Krueng Seunagan adalah satu akses penghubung yang membatasi Desa Alue Buloh dan Desa Latong dan berada di Kecamatan Seunagan Kabupaten Nagan Raya. Jembatan ini telah mengalami penurunan sebesar 80cm akibat bangunan bawah dari jembatan telah menyebabkan perubahan morfologi sungai Alue Buloh dimana dasar sungai yang mengalami pendangkalan oleh sedimentasi dan erosi tebing mengakibatkan sungai semakin melebar. Berdasarkan kondisi permasalahan di atas diperlukan kajian dan identifikasi terhadap jembatan yang berada di lokasi studi, dengan tujuan untuk memperoleh besarnya kedalaman gerusan yang terjadi akibat bangunan bawah jembatan yaitu pilar. Analisis kedalaman gerusan dilakukan menggunakan metode Colorado State University (CSU) dan metode Froehlich. Dengan nilai kedalaman maksimum 2.28 m, lebar pilar 4m, panjang pilar 10m, ukuran rerata diameter partikel (D_{50}) 0.91 m, kecepatan aliran rerata 1,36 m / det, koefisien bentuk pilar (K_1) round nose 0.75, koefisien sudut datang aliran (K_2)⁰ adalah 1 dan koefisien kondisi saluran (K_3) small dunes 1,1, nilai bilangan Froude 0,29 maka hasil analisis kedalaman gerusan menggunakan metode CSU diperoleh sebesar 2,96 m dan dengan metode Froehlich sebesar 1,61 m. Dengan hasil ini diharapkan menjadi masukan bagi Pemerintah Daerah Kabupaten Nagan Raya untuk dapat merencanakan penanganan gerusan lokal akibat adanya pilar jembatan yang sesuai dengan kondisi wilayah studi.

Kata Kunci- Pilar jembatan, Sedimentasi, Kedalaman gerusan, Colorado state university

Abstract

The Alue Buloh Bridge that crosses the Krueng Seunagan River is one of the connecting links that limit the Alue Buloh and Latong Villages and is located in the Seunagan District of Nagan Raya Regency. This bridge has decreased approximately 80cm due to the building under the bridge that has caused a change in the morphology of the Alue Buloh river in the form of a riverbed which has been silenced by sedimentation and cliff erosion result in the river wide. Based on the condition of the problem above, it is necessary to study and identify the bridge located in the study location, intending to obtain the magnitude of the scour depth that occurs due to the building under the bridge, which is a pillar. Scour depth analysis was perform using the Colorado State University (CSU) method. With a maximum depth of 2.28 m, pillar width of 4m, pillar length of 10m, the average size of particle diameter (D_{50}) 0.91 m, the average flow velocity of 1.36 m / sec, pillar shape coefficient (K_1) round nose 0.75, angle of flow coefficient (K_2) ⁰ is 1 and with the small dunes channel condition coefficient (K_3) is 1.1, Froude number 0,29 then the scour depth analysis results using the CSU method are 2,96 m and the Froehlich method are 1,61 m. With this result, that expected to become input for the Regional Government of Nagan Raya Regency to be able to plan local scour handling due to the existence of bridge pillars that are following the conditions of the study area.

Keywords- Bridge piers, Sedimentation, Scour depth, Colorado state university, Froehlich

1. PENDAHULUAN

Permasalahan yang sering ditemui pada sungai adalah terjadinya gerusan lokal dimana akibat proses alamiah akan mempengaruhi morfologi sungai dan dengan adanya bangunan air yang menghalangi aliran air di sungai seperti adanya pilar dari jembatan, abutmen dan lainnya. Banyak kasus pengaruh aliran air dengan adanya jembatan akan menyebabkan keruntuhan dan penurunan dari jembatan. Adanya bangunan air dapat menyebabkan perubahan karakteristik aliran yaitu kecepatan aliran, dimana akan menimbulkan perubahan angkutan sedimen sehingga akan terjadinya gerusan. Angkutan sedimen ini akan menyebabkan penurunan pada dasar saluran alamiah sebagai akibat ketidakstabilan material (Suma et al., 2018).

Pilar ini merupakan bagian paling penting dari jembatan yang berfungsi menahan berat dari badan jembatan itu sendiri dan beban yang melewatinya. Adanya pilar jembatan di satu penampang sungai dapat menyebabkan perubahan pola aliran yang menimbulkan gerusan lokal. Kondisi ini akan menyebabkan terjadinya penurunan elevasi dasar sungai di sekitar pilar. Pola gerusan lokal di sekitar pilar jembatan sangat dipengaruhi oleh bentuk dari pilar yang digunakan. Perbedaan kecepatan aliran yang terjadi akibat adanya pengaruh pilar jembatan akan menyebabkan perbedaan pola gerusan lokal. Faktor-faktor yang mempengaruhi kedalaman gerusan lokal seperti kecepatan aliran, kedalaman aliran, dimensi pilar, jarak antar pilar, sudut datang aliran dan ukuran partikel butiran (Amelia et al., 2017). Gerusan lokal di pilar jembatan sangat berbahaya bila tidak dilakukan penanganan secara tepat dimana dampaknya adalah terjadinya penurunan dari stabilitas dan keamanan jembatan baik struktur bagian atas maupun struktur bagian bawah (Cambodia, 2018).

Kasus gerusan lokal juga terjadi pada jembatan Alue Buloh yang terletak di perbatasan daerah Latong di Kecamatan Seunagan, Kabupaten Nagan Raya. Jembatan yang melintasi Sungai Krueng Seunagan ini merupakan jembatan dengan rangka baja. Jembatan ini dibangun sebagai akses penghubung antara Desa Alue Buloh dan Desa Latong. Permasalahan yang terjadi pada lokasi ini adalah terjadinya gerusan dasar sungai yang sudah sangat mengkhawatirkan pada bagian-bagian *downstream* serta *abutment* ambruk yang kondisinya miring diterjang banjir tahun 2018. Jembatan ini telah mengalami penurunan sebesar 80 cm akibat bangunan bawah dari jembatan telah menyebabkan perubahan morfologi sungai Alue Buloh dimana dasar sungai yang mengalami pendangkalan oleh sedimentasi dan erosi tebing mengakibatkan sungai semakin melebar. Dalam mengantisipasi agar ancaman ini tidak semakin meluas maka dibutuhkan kajian dan identifikasi terhadap perilaku sungai yang ada agar dapat diketahui penyebab terjadinya kerusakan akibat degradasi pada sungai tersebut. Kajian dan identifikasi yang dilakukan dibatasi dimana tidak memperhitungkan struktur dari pilar, namun hanya bentuk pilar yang sesuai dilapangan. Hasil dari kajian ini diharapkan dapat digunakan sebagai salah satu masukan bagi Pemerintah Kota dalam merencanakan bangunan air agar keamanan konstruksi dari pilar jembatan terhadap gerusan lokal dapat diminimalisir.

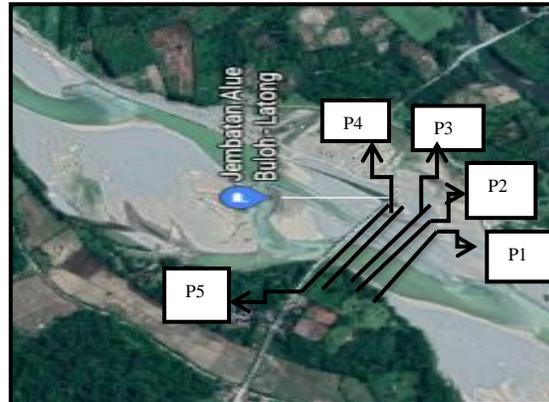
2. METODE PENELITIAN

Lokasi penelitian ini dilakukan pada bagian yang mengalami permasalahan gerusan lokal di bawah jembatan yang ada di Desa Latong Kecamatan Seunagan, Kabupaten Nagan Raya yang terletak di $4^{\circ}13'58''$ BT dan $96^{\circ}17'38.33''$ LU. Jarak ke lokasi penelitian adalah 47 km atau 55 menit dari Kota Meulaboh ke Nagan Raya. Jenis penelitian bersifat kuantitatif dan kualitatif dengan analisis data. Data yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah data yang diperoleh dengan pengamatan dan pengukuran langsung di lapangan guna mengetahui kondisi

lapangan seperti bentuk dari pilar, dimensi pilar, lebar sungai, kecepatan aliran, kedalaman aliran dan sampel sedimen. Data sekunder merupakan data penunjang dimana dilakukan dengan studi literatur berupa buku-buku, jurnal penelitian dan peta pendukung.



Gambar 1. Kondisi Sungai di Jembatan Alue Buloh



Gambar 2. Peta Situasi Wilayah Studi



Gambar 3. Kondisi Erosi pada Tebing Mengakibatkan Sungai Semakin Melebar



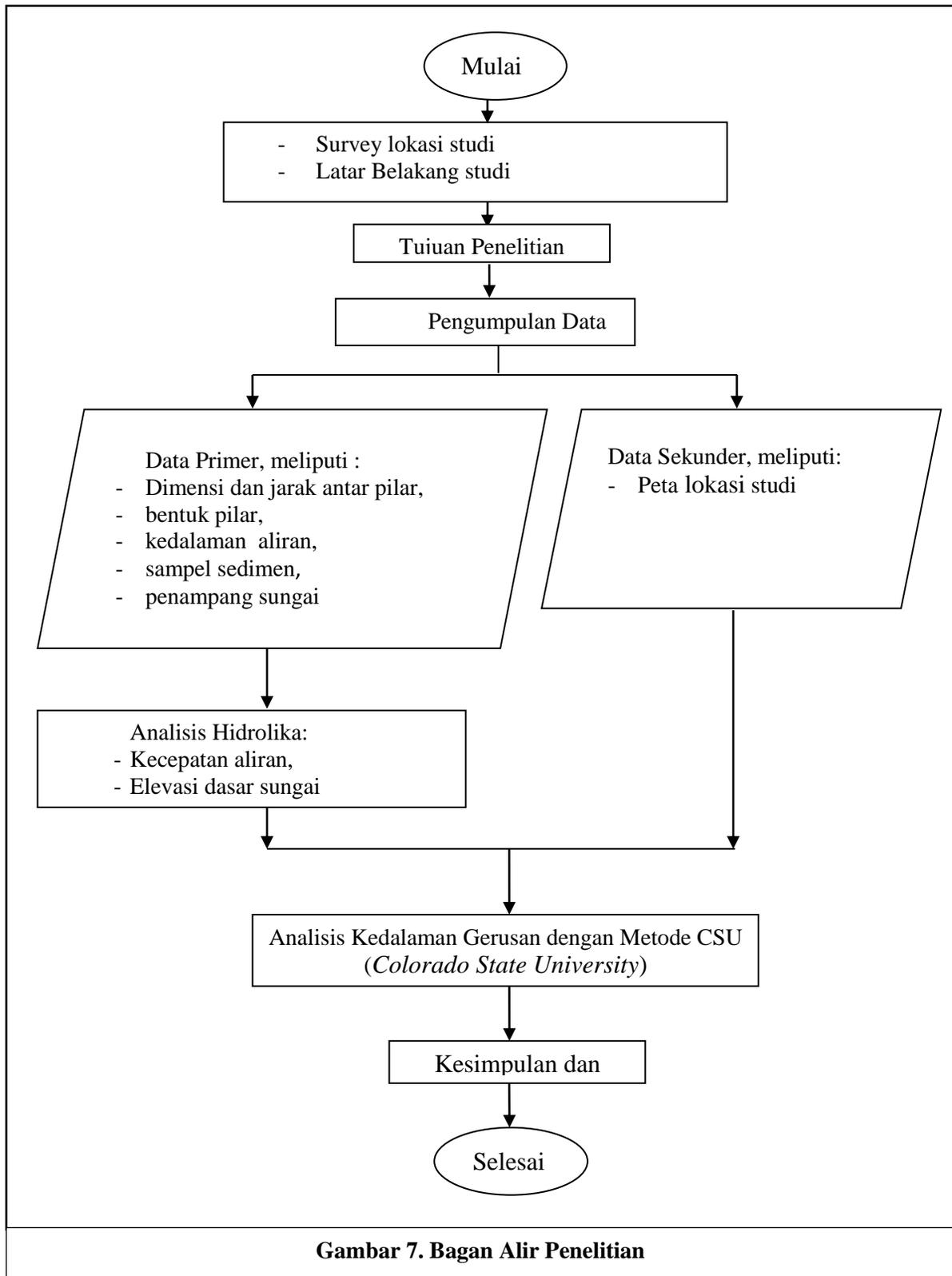
Gambar 4. Kondisi Terjadinya Penurunan Pondasi dan Miringnya Abutment



Gambar 5. Kondisi Gerusan Lokal Disekitar Pilar Jembatan



Gambar 6. Kondisi Sedimentasi pada Sungai Akibat Gerusan



Gambar 7. Bagan Alir Penelitian

Langkah- langkah penelitian ini mengikuti bagan alir penelitian, yaitu:

1. Survey lapangan: mengumpulkan data dimensi pilar, jarak antar pilar, bentuk pilar, sampel sedimen, kedalaman aliran, dan kecepatan aliran.
2. Cara pengukuran kecepatan aliran air pada sungai dengan pelampung adalah :
 - a. Menetapkan titik di sisi sungai dan diseberang sungai menggunakan patok kayu, kemudian kedua titik dihubungkan (tegak lurus arah aliran);
 - b. Jarak L , yang digunakan pada pengukuran ini adalah 10 meter;
 - c. Pelampung dihanyutkan kemudian stopwatch dijalankan saat pelampung diturunkan dan stopwatch dihentikan saat pelampung sudah melewati jarak yang sudah ditentukan dan waktu (T) aliran pelampung didapatkan;
 - d. Kecepatan aliran disungai hanya didapatkan dari permukaan sungai akibat keterbatasan alat. Kecepatan aliran diperoleh dari jarak dibagi dengan waktu tempuh (L/T) dalam m/det;
 - e. Pengukuran dilakukan sebanyak 3 kali dengan titik yang sama, kemudian nilai kecepatan rerata aliran didapatkan.
3. Cara pengukuran elevasi dasar sungai berdasarkan data penampang memanjang dan penampang melintang sungai:
 - a. Menentukan titik di bagian hulu sungai sebagai titik datum (pada alur sungai yang belum tergerus).
 - b. Bagi menjadi beberapa pias sungai searah memanjang.
 - c. Dari tiap pias dibagi kedalam beberapa titik dengan jarak masing-masing.
 - d. Ukur elevasi dasar di tiap segmen pada pias yang sudah dibagi dengan alat theodolite.
 - e. Hasil pengukuran diolah untuk mendapatkan data pengukuran searah memanjang dan melintang dasar sungai.
 - f. Buat gambar potongan memanjang dan melintang dasar sungai untuk mendapatkan topografi dasar sungai di tiap pias.
 - g. Buat peta situasi dari lokasi yang menjadi tinjauan penelitian.
 - h. Buat skema untuk pengukuran elevasi dasar sungai.
4. Cara pengukuran analisis ukuran butiran dari sampel sedimen:
 - a. Tujuan pengukuran analisis ukuran butiran adalah untuk mengetahui distribusi ukuran butir tanah, mengklasifikasikan tanah butir kasar berdasarkan nilai koefisien keseragaman (C_u) dan kurva distribusi ukuran butiran.
 - b. Sampel sedimen yang diambil di lokasi penelitian dilakukan uji analisis saringan (dari saringan no 4 sampai saringan no 200) untuk memperoleh persentase sedimen lolos saringan.
 - c. Buat grafik analisis saringan, korelasi antara sedimen yang tertahan dengan persentase sedimen lolos.
 - d. Ukuran butiran yang digunakan adalah ukuran butiran rerata (D_{50}) yang terbaca di grafik
5. Analisis besarnya kedalaman gerusan menggunakan persamaan empiris dengan Metode Colorado State University (CSU) (Richardson, 1990 dalam Achmadi, 2001) dan metode Froehlich (Froehlich, 1988 dalam Achmadi, 2001).

$$d_s = 2,0 \cdot y \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot F^{0,43} \left(\frac{b}{y}\right)^{0,65} \quad (1)$$

Persamaan yang dikembangkan oleh Dr. David Froehlich (1988) dalam Achmadi (2001), menyatakan bahwa kedalaman gerusan sebagai fungsi dari bilangan Froude, lebar pilar, sudut aliran, jenis pilar dan ukuran butiran. Adapun bentuk persamaannya yaitu seperti di bawah ini :

$$d_s = 0,32 \cdot b \cdot K_1 \left(\frac{b'}{b}\right)^{0,02} \cdot \left(\frac{y}{b}\right)^{0,46} \cdot Fr^{0,2} \left(\frac{b}{d_{50}}\right)^{0,08} + 1,0 \quad (2)$$

$$b' = b \cdot \cos \beta + l \cdot \sin \beta \quad (3)$$

Dimana:

d_s = Kedalaman gerusan (m);

Fr = Bilangan Froude y ;

y = Kedalaman aliran (m);

K_1 = Koefisien jenis/bentuk pilar;

K_2 = Koefisien sudut datang aliran;

K_3 = Koefisien kondisi saluran;

b = Lebar pilar;

θ = Sudut aliran;

l = Panjang pilar (m);

d_{50} = Ukuran butiran (m);

K = Koefisien jenis pilar ($K=1,3$ untuk pilar berujung kotak, $K=1,0$ untuk pilar bulat dan berujung bulat, $K=0,7$ untuk pilar berujung lancip).

Menurut Chow (1988), akibat gaya tarik bumi terhadap aliran dinyatakan dengan rasio inersia dan gaya tarik bumi (g). Rasio inersia ini disebut bilangan Froude (Fr). Bilangan Froude untuk saluran terbuka dinyatakan sebagai berikut (Triatmodjo, 1996 dalam Mukti, 2016): 1) Aliran kritis, dimana $Fr=1$ yaitu aliran yang diakibatkan oleh adanya riak seperti diakibatkan oleh batu yang dilempar ke dalam sungai; 2) Aliran sub kritis, dimana $Fr<1$ yaitu aliran yang kedalaman alirannya lebih besar dari pada kecepatan aliran; 3) Aliran super kritis, dimana $Fr>1$ yaitu aliran yang kedalaman alirannya relatif lebih kecil dari kecepatan aliran.

Persamaan untuk menghitung bilangan Froude, yaitu:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (4)$$

Dimana:

Fr = Bilangan Froude;

V = Kecepatan aliran (m/det);

g = Percepatan gravitasi (m/det²).

Tabel 1 Harga Faktor Koreksi K_1

No	Bentuk Ujung Pilar	K_1
1	Bentuk Persegi	1,1
2	Bentuk Lingkaran	1
3	Bentuk Silinder Lingkaran	1
4	Bentuk Kumpulan Silinder	1

Tabel 2 Faktor Koreksi K_2

No	Sudut aliran	$l/b = 4$	$l/b = 8$	$l/b = 12$
1	0	1,0	1,0	1,0
2	15	1,0	2,0	2,5
3	30	2,0	2,5	3,5
4	45	2,3	3,3	4,3
5	90	3,9	3,9	5,0

Tabel 3 Faktor Koreksi K_3

No	Kondisi saluran	Ukuran	K3
1	Gerusan air bening	n.a	1,1
2	Anti bukit pasir	n.a	1,1
3	Bukit pasir kecil	0,6-3,0 m	1,1
4	Bukit pasir sedang	3,0-9,1 m	1,1-1,2
5	Bukit pasir besar	> 9.1 m	1,3

Sumber : Richardson, 1990 dalam Achmadi, 2001

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran kecepatan aliran

Pengukuran kecepatan aliran air pada sungai dilakukan di 5 (lima) pias (seperti yang terlihat pada Gambar 2 Peta situasi wilayah studi) dengan 12 (dua belas) segmen titik pengukuran dengan jarak 20 meter (tegak lurus aliran). Hasil pengukuran kecepatan aliran air ditunjukkan pada Tabel di bawah. Dari hasil pengukuran diperoleh kecepatan aliran rerata sebesar 1,36 m/det.

Tabel 4 Pengukuran Kecepatan Aliran

Pias	Segmen											
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
P1	1.47	1.40	1.38	1.20	1.49	0.00	0.00	0.00	0.00	1.49	1.49	1.51
P2	1.48	1.37	1.35	1.20	1.48	0.00	0.00	0.00	0.00	1.50	1.50	1.51
P3	1.45	1.30	1.28	1.20	1.50	0.00	0.00	0.00	0.00	1.49	1.50	1.48
P4	1.19	1.16	1.12	1.02	1.51	0.00	0.00	0.00	0.00	1.49	1.48	1.50
P5	1.15	1.12	1.09	1.02	1.51	0.00	0.00	0.00	0.00	1.45	1.40	1.30

Pengukuran kedalaman aliran

Pengukuran kedalaman aliran air pada sungai menggunakan bak ukur dan dilakukan pada 5 (lima) pias dengan 12 (dua belas) segmen titik pengukuran. Hasil pengukuran kedalaman aliran air ditunjukkan pada Tabel di bawah. Dari hasil pengukuran lapangan diperoleh kedalaman aliran maksimum sebesar 2,28 m. Pada segmen 6 (S6) sampai dengan segmen 9 (S9) tidak ada kedalaman aliran dikarenakan di titik tersebut adanya sedimentasi setinggi muka air.

Tabel 5 Pengukuran Kedalaman Aliran

Pias	Segmen											
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
P1	1.96	1.60	1.41	0.79	1.90	0.00	0.00	0.00	0.00	1.98	2.20	2.20

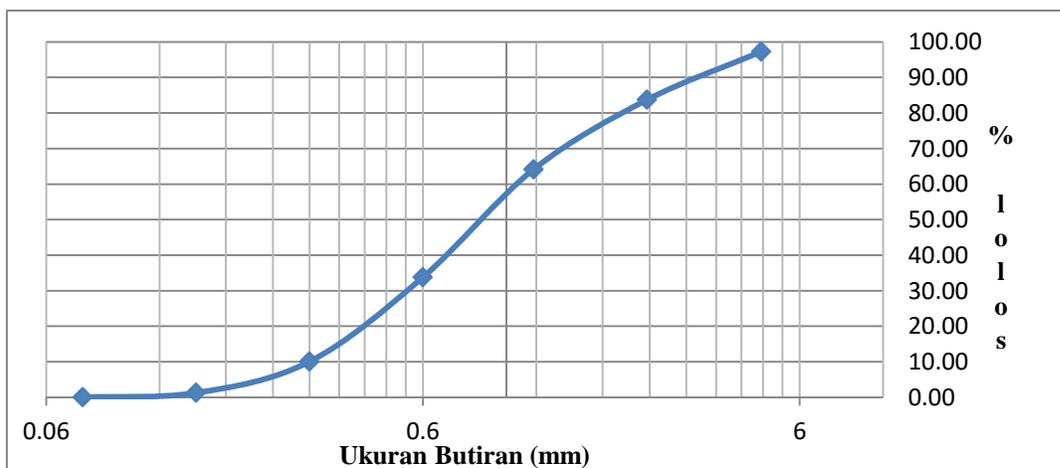
P2	1.96	1.58	1.40	1.44	1.76	0.00	0.00	0.00	0.00	1.88	2.28	2.20
P3	2.18	1.90	1.46	1.48	1.70	0.00	0.00	0.00	0.00	1.90	2.18	2.20
P4	2.01	1.91	1.47	1.40	1.70	0.00	0.00	0.00	0.00	1.82	2.11	2.19
P5	1.85	1.82	1.79	1.75	1.85	0.00	0.00	0.00	0.00	1.90	2.05	2.00

Analisis ukuran butir sedimen

Analisis ukuran butir dilakukan untuk mendapatkan diameter butir yang dibutuhkan sebagai parameter dalam perhitungan kedalaman gerusan. Variabel yang akan diperoleh adalah diameter rata-rata ukuran partikel sedimen D_{50} dan D_{95} . Hasil analisis butiran sedimen yang telah dilakukan (gambar 8 di bawah) diperoleh nilai rata-rata ukuran butir sedimen untuk D_{50} adalah 0,91 mm.

Tabel 6 Analisis Ukuran Butir Sedimen

Ukuran Saringan	Diameter Saringan (mm)	Tanah Tertahan (gram)	% Tanah Tertahan	Berat Tanah Lolos	% Tanah Lolos
4	4.75	5.46	2.73	194.54	97.27
8	2.36	27.14	13.57	167.40	83.70
16	1.18	39.14	19.57	128.26	64.13
30	0.6	60.68	30.34	67.58	33.79
50	0.3	47.49	23.74	20.09	10.05
100	0.15	17.57	8.78	2.53	1.26
200	0.075	2.53	1.26	0.00	0.00



Gambar 8. Grafik Ukuran Butiran Sedimen

Analisis kedalaman gerusan dengan metode empiris

Perhitungan kedalaman gerusan dengan metode Colorado State University (CSU) menggunakan persamaan 1 dan dengan metode Froehlich menggunakan persamaan 2 dan 3. Data yang diperoleh di lapangan ditunjukkan pada Tabel di bawah ini:

Tabel 7 Parameter Data Lapangan Untuk Analisis Kedalaman Gerusan

Parameter	Nilai Data	Parameter	Nilai Data
Lebar pilar (b)	4,0 m	Kedalaman aliran maksimum (y)	2,28 m
Jumlah Pilar	2	Koefisien bentuk pilar (K1)	0,7
Jarak antar pilar	6 m	Koefisien sudut datang aliran (K2)	1,0
Kecepatan aliran rerata (V)	1,36 m ² /det	Koefisien kondisi saluran (K3)	1,1
Ukuran partikel butiran (D50)	0,91 mm	Nilai bilangan Froude (FR)	0,29

$$d_s = 2,0 * y * K_1 * K_2 * K_3 * F^{0,43} \left(\frac{b}{y}\right)^{0,65}$$

$$d_s = 2,0 * 2,28 * 0,7 * 1,0 * 1,1 * (0,29^{0,43}) * \left(\frac{4}{2,28}\right)^{0,65} = 2,96m$$

Berdasarkan hasil analisis kondisi eksisting dan data lapangan, diperoleh kedalaman gerusan yang terjadi pada Sungai Krueng Seunagan yang membatasi Desa Alue Buloh dan Desa Latong akibat adanya pilar jembatan sebesar dengan metode Colorado State University (CSU) 2,96m.

$$b' = b * \cos \beta + 1 * \sin \beta = 4 * \cos 0 + 1 * \sin 0 = 4$$

$$d_s = (0,32 * b * K * \left(\frac{b'}{b}\right)^{0,02} * \left(\frac{y}{b}\right)^{0,46} * Fr^{0,2} * \left(\frac{b}{d_{50}}\right)^{0,08}) + 1,0$$

$$d_s = (0,32 * 0,7 * \left(\frac{4}{4}\right)^{0,02} * \left(\frac{2,28}{4}\right)^{0,46} * (0,29^{0,2}) * \left(\frac{4}{0,91}\right)^{0,08}) + 1,0 = 1,61m$$

Hasil analisis dengan metode Froehlich berdasar data yang diperoleh di lapangan, didapat kedalaman gerusan lokal sebesar 1,61 m. Berdasarkan hasil analisis kedalaman gerusan lokal antara metode CSU dengan Froehlich, dapat disimpulkan bahwa bila dibandingkan dengan data dari pengukuran di lapangan, persamaan CSU ditemukan lebih andal menghitung gerusan akibat adanya pilar bila dibandingkan dengan persamaan Froehlich. Ini dikarenakan CSU memiliki empat faktor koreksi yaitu koreksi terhadap bentuk penampang pilar, koreksi terhadap arah datang aliran air, dan koreksi terhadap material dasar saluran.

4. KESIMPULAN

1. Hasil analisis butiran sedimen diperoleh nilai rata-rata ukuran butir sedimen untuk D₅₀ adalah 0,91 mm dan D₉₅ adalah 4,35 mm.
2. Kedalaman gerusan yang terjadi pada Sungai Krueng Seunagan akibat pengaruh pilar dari jembatan dengan menggunakan Metode Colorado State University (CSU) diperoleh sebesar 1,96m dan metode Froehlich sebesar 1,61 m.
3. Kondisi analisis ini hanya menggunakan data kedalaman aliran maksimum di lapangan dengan tidak mengabaikan kondisi adanya sedimentasi pada sungai dan tidak menggunakan data debit banjir puncak dengan kala ulang tertentu.

5. SARAN

Penelitian selanjutnya dapat dilakukan menggunakan beberapa metode empiris lainnya untuk menganalisis kedalaman gerusan dan juga dapat menggunakan software Hecras 5.0.7, dimana memperhitungkan debit banjir puncak dengan kala ulang 100 tahun. Selanjutnya Perlu dilakukan juga kajian di laboratorium terhadap kedalaman gerusan lokal dengan bentuk pilar yang berbeda. Perlu adanya kajian terhadap upaya penanganan dalam meminimalisir gerusan lokal seperti penggunaan krib, *ground sill* dan lainnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada teman-teman dan mahasiswa yang terlibat dalam penelitian ini yang mana telah memberi dukungan waktu dan tenaga sehingga penelitian tentang Analisis Gerusan Lokal Pada Jembatan Alue Buloh dapat berjalan dan menghasilkan tujuan penelitian ini dengan baik. Hasil penelitian ini akan menjadi bahan masukan kepada Pemerintah Kabupaten Nagan Raya untuk dapat merencanakan penanganan gerusan lokal agar permasalahan gerusan dapat diminimalisir.

DAFTAR PUSTAKA

1. Achmadi, T., 2001, *Model Hidraulik Gerusan pada Pilar Jembatan*, Universitas Diponegoro Semarang.
2. Amelia, A., Lasminto, U., & Sarwono, B., 2017, *Studi Kapasitas Angkut dan Gerusan Lokal Pada Penampang Sungai Brantas Akibat Pilar Jembatan Tol Mojokerto-Kertosono*, Jurnal Teknik ITS, 6(2), <https://doi.org/10.12962/j23373539.v6i2.26543>
3. Ariyanto, Anton, 2010, *Analisis Bentuk Pilar Jembatan Terhadap Potensi Gerusan Lokal*, Jurnal APTEK, Vol. 2, No. 1, halaman 40- 49.
4. Cambodia, M., 2018, *Evaluasi Dampak Groundsill Dalam Mengurangi Gerusan pada Pilar Jembatan Menggunakan Software HEC-RAS*. Journal of Chemical Information and Modeling, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
5. Chow, V.T., Maidment D.R., Mays L.W., 1988, *Applied Hydrology*, Mc. Graw-Hill Book Company, Singapore.
6. Miller Jr, W., 2003, *Model For The Time Rate Of Local Sediment Scour At A Cylindrical Structure*, Disertasi, Florida : PPS Universitas Florida.
7. Mukti, Wibawa, A., 2016, *Pengaruh Bentuk Pilar Jembatan Terhadap Gerusan Lokal Menggunakan Software iRIC.*, Tugas Akhir, Fakultas Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
8. Purnomo, S. N., Nasta'in, , Widiyanto, W., & Salsabilla, L., (2017), *Efektivitas Bentuk Abutmen Terhadap Gerusan di Sekitar Abutmen Jembatan*. Jurnal Teknik Sipil. <https://doi.org/10.24002/jts.v13i4.940>
9. Rahmadani, Sarra, 2014, *Mekanisme Gerusan Lokal Dengan Variasi Bentuk Pilar (Eksperimen)*, Skripsi, Fakultas Teknik Sipil, Universitas Sumatera Utara, Medan.
10. Suma, M. F., Halim, F., & Hendratta, L. A., (2018), *Analisis Gerusan Lokal pada Pilar Jembatan Kuwil Kabupaten Minahasa Utara Menggunakan Metode Empiris*. 6(11), 1017–1028.