

ANALISIS GERUSAN LOKAL PADA PILAR JEMBATAN KUWIL KABUPATEN MINAHASA UTARA MENGGUNAKAN METODE EMPIRIS

Muayyad Feisal Suma

Fuad Halim, Liany A. Hendratta

Fakultas Teknik Jurusan Sipil Universitas Sam Ratulangi Manado

Email: ayyadfeisal_mfs@icloud.com

ABSTRAK

Penelitian tentang analisis gerusan lokal pada pilar jembatan dengan menggunakan metode empiris dilakukan untuk mengetahui besarnya kedalaman gerusan, pola gerusan dan kesesuaian formula yang digunakan dalam perhitungan gerusan lokal terhadap kondisi lapangan.

Kedalaman gerusan dianalisa melalui 2 tahap yaitu analisa fisik dan analisa menggunakan metode empiris, untuk analisa fisik dilakukan dengan pengukuran secara langsung di lapangan dengan menggunakan alat theodolite. Pengukuran elevasi dilakukan dengan cara membagi sungai arah memanjang dalam beberapa pias (P) dan setiap pias dibagi dalam beberapa titik (S) dengan jarak 2 m dan analisa dengan metode empiris, metode yang digunakan adalah metode Laursen dan Toch, Metode Froehlich, dan Colorado State University. Bentuk pilar yang dianalisis adalah pilar kumpulan silinder dengan jarak antar pilar 3,8 m dan lebar 1,2 m. Debit yang digunakan pada penelitian ini adalah debit puncak (peak discharge) yaitu 177,4 m³/det.

Berdasarkan hasil analisa fisik dan analisa menggunakan metode empiris yang memiliki kedalaman gerusan : metode Laursen dan Toch = 1,77 m, metode Froehlich = 1,471 m, dan metode Colorado State University (CSU) = 2.73 m, ke tiga metode tersebut memiliki kesesuaian namun perhitungan kedalaman gerusan menurut metode Froehlich memiliki hasil yang lebih mendekati hasil analisa fisik.

Kata Kunci : *Pilar Jembatan Kuwil, Metode Empiris, Gerusan Lokal*

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Sungai adalah saluran terbuka yang terbentuk secara alami di muka bumi yang mengalir menurut kondisi permukaan bumi dari mata air melewati beberapa alur sungai menuju ke danau atau laut secara dinamis. Air yang mengalir di dalam sungai akan mengakibatkan penggerusan tanah dasarnya. Proses gerusan dapat terjadi karena adanya perubahan morfologi sungai berupa tikungan dan penyempitan saluran atau adanya bangunan-bangunan air seperti pilar, abutmen, bendung, dan sebagainya.

Pembuatan suatu ruas jalan untuk transportasi darat pasti akan melintasi suatu alur sungai sehingga dibutuhkan konstruksi jembatan. Salah satu struktur utama bagian bawah adalah pilar jembatan yang secara langsung berhubungan dengan aliran air.

Adanya pilar jembatan pada ruas sungai menyebabkan perubahan pola aliran yang menimbulkan gerusan lokal di sekitar pilar sehingga mengakibatkan penurunan elevasi dasar sungai.

Banyak kasus-kasus runtuhnya jembatan di Indonesia khususnya di Sulawesi Utara bukan hanya disebabkan oleh faktor konstruksi jembatan, namun persoalan gerusan di sekitar pilar bisa menjadi penyebab kerusakan dan keruntuhan konstruksi jembatan, hal ini ditunjukkan karena proses gerusan yang terjadi secara terus menerus sehingga terjadi penurunan pada pangkal pilar.

Kasus seperti di jembatan Kuwil di Kecamatan Kalawat, Kabupaten Minahasa Utara terjadi kerusakan pada konstruksi jembatan yang disebabkan oleh beberapa faktor yang salah satunya adalah gerusan lokal. Peristiwa ini dapat terjadi akibat kurangnya ketelitian dalam perencanaan awal dalam menentukan kedalaman pondasi jembatan yang sering mengabaikan analisa perhitungan gerusan lokal. Penelitian mengenai gerusan lokal pada bangunan-bangunan khususnya pilar jembatan perlu dilakukan, karena dampak dari gerusan lokal pada pilar yang akan menurunkan keamanan struktur jembatan.

Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka perlu dilakukan analisis gerusan lokal pada pilar jembatan kuwil.

Batasan Masalah

Dalam penelitian ini, masalah yang akan diteliti dibatasi pada hal-hal sebagai berikut :

1. Bentuk pilar yang akan dianalisis adalah pilar yang sesuai di lapangan yaitu pilar kumpulan silinder.
2. Metode yang digunakan dalam penelitian adalah :
 - Metode Laursen dan Toch.
 - Metode Froehlich.
 - Metode Colorado State University (CSU).
3. Debit yang digunakan dalam penelitian adalah debit puncak.
4. Perhitungan struktur pilar tidak diperhitungkan.

Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini yaitu untuk :

1. Mengetahui besarnya gerusan lokal di sekitar pilar jembatan.
2. Mengetahui pola gerusan yang terjadi di sekitar pilar jembatan.
3. Mengetahui kesesuaian formula yang digunakan dalam perhitungan gerusan lokal terhadap kondisi lapangan.

Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini adalah :

1. Hasil dari penelitian ini diharapkan memberikan manfaat dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi terutama pada bidang hidrolika yang berkaitan dengan konsep gerusan lokal pada pilar jembatan.
2. Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai salah satu masukan untuk perencanaan dalam kaitannya dengan perencanaan bangunan air, khususnya dalam keamanan dalam konstruksi pilar jembatan terhadap gerusan lokal.
3. Hasil penelitian ini diharapkan dapat dijadikan salah satu sumber informasi untuk pengembangan penelitian lebih lanjut.

LANDASAN TEORI

Gerusan

Merupakan suatu proses alamiah yang terjadi di sungai sebagai akibat pengaruh morfologi

sungai (dapat berupa tikungan atau bagian penyempitan aliran sungai) atau adanya bangunan air (*hydraulic structure*) seperti: jembatan, bendung, pintu air, dan lain-lain.

Jenis-jenis Gerusan

Gerusan yang terjadi dapat digolongkan menjadi 3 yaitu :

1. Gerusan Umum (*General Scour*)

Yaitu bertambah dalamnya dasar saluran sungai akibat interaksi yang terjadi antara aliran yang terjadi pada sungai dengan material dasar sungai. Hal ini menyebabkan terjadinya angkutan sedimen pada sungai, yang dapat di bagi menjadi :

- a) Angkutan sedimen dasar adalah pergerakan material lepas dasar sungai yang bergerak mengelinding, bergeser atau melompat-lompat di dasar sungai atau saluran akibat gaya seret aliran.
- b) Angkutan sedimen layang adalah pergerakan material lepas yang berasal dari dasar sungai atau hasil kikisin permukaan daerah tangkapan hujan, bergerak melayang bersama aliran dan dapat mengendap jika gaya berat material tersebut lebih besar daripada kombinasi gaya angkat air dan gaya akibat turbulensi aliran.
- c) Angkutan sedimen kikisan adalah pergerakan material lepas yang berasal dari hasil kikisan permukaan daerah tangkapan hujan, bergerak melayang bersama aliran, sukar mengendap, kecuali ditampung waduk atau muara sungai.

2. Gerusan Lokal (*Local Scour*)

Gerusan lokal adalah penggerusan pada dasar atau tebing sungai yang terjadi setempat di sekitar bangunan akibat peningkatan energi dan turbulensi aliran karena gangguan bangunan atau gangguan alami. Gerusan lokal dapat dibagi menjadi dua yaitu :

a) Kondisi tidak ada angkutan sedimen (*Clear water scour*)

Yaitu pergerakan sediment hanya terjadi pada sekitar abutmen yang timbul akibat tegangan geser yang terjadi lebih besar dari pada tegangan geser kritis, yang dapat dibedakan menjadi :

- Untuk $\left(\frac{U}{U_{cr}}\right) \leq 0,5$

Yaitu, kondisi gerusan lokal tidak terjadi dan proses transportasi sedimen tidak terjadi.

- Untuk $0,5 \leq \left(\frac{U}{U_{cr}}\right) \leq 1,0$ yaitu, kondisi gerusan lokal terjadi menerus dan proses transportasi sedimen tidak terjadi.

b) Kondisi ada angkutan sedimen (*Live bed scour*)

Terjadi akibat adanya perpindahan sedimen yaitu jika

$$\left(\frac{U}{U_{cr}}\right) \geq 1,0$$

Keterangan :

U = Kecepatan Aliran rata-rata (m/dtk)

u_{cr} = Kecepatan aliran kritis (m/dtk)

3. Gerusan akibat adanya penyempitan di alur sungai (*contraction scour*).

Gerusan ini terjadi akibat perubahan bentuk morfologi sungai yang semakin menyempit yang sebagian besar di akibatkan adanya bangunan air.

Bilangan Froude

Menurut Chow (1959) dalam buku *Open Channel Hydraulics* dijelaskan bahwa akibat gaya tarik bumi terhadap aliran dinyatakan dengan rasio inersia dengan gaya tarik bumi (g). Rasio ini diterapkan sebagai bilangan Froude (f_r). Bilangan Froude untuk saluran terbuka dinyatakan sebagai berikut (Mukti,2016) :

1. Aliran kritis, merupakan aliran yang mengalami gangguan permukaan, seperti yang diakibatkan oleh riak yang terjadi karena batu yang dilempar ke dalam sungai tidak akan bergerak menyebar melawan arus. Aliran dapat dikategorikan aliran kritis apabila bilangan Froude memiliki nilai sama dengan satu ($f_r = 1$).
2. Aliran sub kritis, pada aliran ini biasanya kedalaman aliran lebih besar dari pada kecepatan aliran rendah, semua riak yang timbul dapat bergerak melawan arus. Apabila bilangan lebih kecil dari satu ($f_r < 1$) maka termasuk aliran sub kritik.
3. Aliran super kritis, pada aliran ini kedalaman aliran relatif lebih kecil dan kecepatan relatif tinggi, segala riak yang ditimbulkan dari suatu gangguan adalah mengikuti arah arus. Apabila bilangan Froude lebih besar dari satu ($f_r > 1$) maka aliran tersebut termasuk aliran super kritis.

Persamaan untuk menghitung bilangan Froude, yaitu : $f_r = \frac{u}{\sqrt{g.h}}$

Keterangan :

f_r = bilangan Froude

u = kecepatan aliran (m/dtk)

g = percepatan gravitasi (m/dtk²)

h = kedalaman aliran (m)

Mekanisme Gerusan

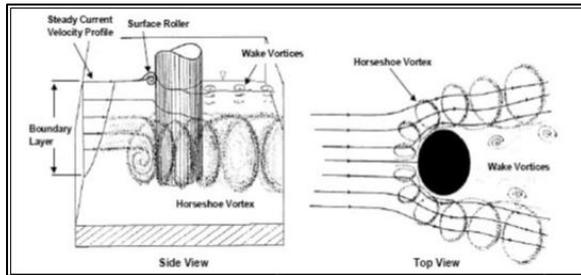
Gerusan lokal umumnya terjadi pada alur sungai yang terhalang pilar jembatan akibatnya menyebabkan adanya pusaran. Pusaran tersebut terjadi pada bagian hulu pilar. Isnugroho (1992) dalam Aisyah (2004) menyatakan bahwa adanya pilar akan mengganggu kestabilan butiran dasar. Bila perubahan air hulu tertahan akan terjadi gangguan pada elevasi muka air di sekitar pilar. Selanjutnya aliran akan berubah secara cepat. Karena adanya percepatan aliran maka elevasi muka air akan turun.

Pola aliran disekitar pilar pada aliran saluran terbuka cukup kompleks. Bertambahnya kompleksitas disertai semakin luasnya lubang gerusan. Suatu sail studi mengenai bentuk/pola aliran yang telah dilanjutkan oleh Melville dalam Indra (2000) agar lebih mengerti mekanisme dan peran penting pola aliran hingga terbentuknya lubang gerusan. Pola aliran dibedakan dalam beberapa komponen :

1. Arus bawah didepan pilar.
2. Pusaran sepatu kuda (*horse shoes vortex*).
3. Pusaran yang terangkat (*cast-off vortices*) dan menjalar (*wake*).
4. Punggung gelombang (*bow wave*).

Menurut Miller (2003) jika struktur ditempatkan pada suatu arus air, aliran air di sekitar struktur tersebut akan berubah, dan gradien kecepatan vertikal (*vertical velocity gradient*) dari aliran akan berubah menjadi gradien tekanan (*pressure gradient*) pada ujung permukaan struktur tersebut. Gradien tekanan (*pressure gradient*) ini merupakan hasil dari aliran bawah yang membentur *bed*. Pada dasar struktur, aliran bawah ini membentuk pusaran yang pada akhirnya menyapu sekeliling dan bagian bawah struktur dengan memenuhi seluruh aliran. Hal ini dinamakan pusaran tapal kuda (*horseshoe vortex*), karena dilihat dari atas bentuk pusaran ini mirip tapal kuda.

Pada permukaan air, interaksi aliran dan struktur membentuk busur ombak (*bow wave*) yang disebut sebagai gulungan permukaan (*surface roller*). Pada saat terjadi pemisahan aliran pada struktur bagian dalam mengalami *wake vortices*.



Gambar 1. Mekanisme Gerusan Akibat Pola Aliran Air di Sekitar Pilar (Sumber : Miller, 2003)

Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kedalaman Gerusan

Kecepatan Aliran

Kedalaman gerusan lokal maksimum merata di sekitar pilar sangat tergantung nilai relatif kecepatan alur sungai (perbandingan antara kecepatan merata aliran dan kecepatan geser), nilai diameter butiran dan lebar pilar. Dengan demikian maka gerusan lokal maksimum merata tersebut merupakan gerusan lokal maksimum dalam kondisi setimbang.

Kedalaman Aliran

Kedalaman gerusan lokal yang terjadi dipengaruhi oleh kedalaman dasar sungai dari muka air (tinggi aliran zat air), maka kecepatan relatif (u/u^*c) dan kedalaman relatif (y_0/b) merupakan faktor penting untuk mengestimasi kedalaman gerusan lokal ini.

Ukuran Butiran

Ukuran Butiran dari sedimen transpor merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kedalaman gerusan. Kedalaman gerusan (y_s/b) tak berdimensi merupakan fungsi dari karakteristik gradasi sedimen material dasar.

Bentuk Pilar

Pengaruh bentuk pilar berdasarkan potongan horizontal dari pilar telah diteliti oleh Laursen dan Toch (1956), Neil (1973) dan Dietz (1972).

Hal ini juga tergantung pada panjang dan lebar (l/b) masing-masing bentuk. Macam-macam bentuk pilar antara lain : silinder, persegi (*rectangular*), persegi dengan ujung setengah lingkaran (*rectangular with semi circular nose*), ujung setengah lingkaran dengan bentuk belakang lancip (*semi circular nose with wedge shape tail*), persegi dengan sisi depan miring (*rectangular with wedge shape nose*), elips (*elliptic*), lenticular, dan aerofoil.

Posisi Pilar (Sudut Kemiringan Pilar)

Kedalaman gerusan lokal tergantung pada kedudukan / posisi pilar terhadap arah aliran yang terjadi serta panjang dan lebarnya pilar. Karena kedalaman gerusan merupakan rasio dari panjang dan lebar serta sudut dari tinjauan terhadap arah aliran.

Metode Empiris untuk Menghitung Kedalaman Gerusan

Ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk menghitung kedalaman gerusan yang terjadi pada dasar sungai di sekitar pilar, diantaranya :

Metode Laursen dan Toch

Laursen dan toch dalam (1956) dalam Achmadi (2001) mengembangkan persamaan gerusan yang terjadi pada pilar jembatan sebagai fungsi lebar pilar dan kedalaman aliran.

Persamaannya sebagai berikut :

$$d_s = 1.35 b^{0,7} y^{0,3}$$

Keterangan :

- d_s = kedalaman gerusan (m)
- b = lebar pilar (m)
- y = kedalaman aliran (m)

Metode Froehlich

Persamaan yang dikembangkan oleh Dr. David Froehlich (Froehlich, 1988) dalam Achmadi (2001) mengatakan bahwa kedalaman gerusan sebagai fungsi bilangan *Froude*, lebar pilar, sudut aliran, jenis pilar, dan ukuran butiran. Persamaannya sebagai berikut :

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

Keterangan :

- d_s = kedalaman gerusan (m)
- f_r = bilangan *Froude*
- y = kedalaman aliran (m)
- b = lebar pilar
- b' = $b \cos \theta + 1 \sin \theta$
- 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).

Metode Colorado State University (CSU)

Persamaan Colorado State University (CSU) dikemukakan oleh Richardson (1990) dalam Achmadi (2001) adalah persamaan yang paling sering digunakan di Amerika.

Persamaan tersebut seperti dibawah ini :

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

Keterangan :

- d_s = kedalaman gerusan (m)
- f_r = bilangan Froude
- b = lebar pilar (m)
- y = kedalaman aliran (m)
- K_1 = koefisien bentuk pilar (Tabel 1)
- K_2 = koefisien sudut aliran (Tabel 2)
- K_3 = koefisien kondisi dasar saluran (Tabel 3)

Tabel 1 Koefisien koreksi terhadap bentuk pilar (K_1)

Bentuk Ujung Pilar	K_1
Persegi	1,1
Bulat	1,0
Lingkaran Silinder	1,0
Kumpulan Silinder	1,0
Tajam	0,9

Tabel 2 Koefisien Koreksi terhadap sudut aliran (K_2)

Sudut aliran	1/b = 4	1/b = 8	1/b = 12
0	1,0	1,0	1,0
15	1,0	2,0	2,5
30	2,0	2,5	3,5
45	2,3	3,3	4,3
90	2,5	3,9	5,0

Tabel 3 Koefisien koreksi terhadap kondisi dasar saluran (K_3)

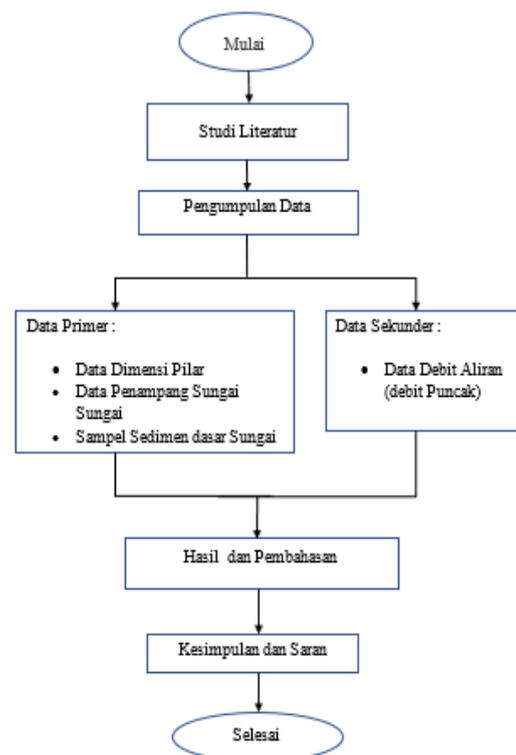
Kondisi Saluran	Ukuran	K_3
Clear water scour	-	1,1
Dasar rata	-	1,1
Gundukan kecil	0,6-3,0 m	1,1
Gundukan sedang	3,0-9,1 m	1,1-1,2
Gundukan besar	>9,1 m	1,3

METODOLOGI PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Survei lapangan
Survei dilakukan untuk mengidentifikasi permasalahan yang terjadi di lapangan dan juga melihat langsung kondisi bangunan yang ada di Kecamatan Kalawat, Kabupaten Minahasa Utara
2. Studi Pustaka
Studi literatur dilakukan dengan mengkaji buku-buku dan referensi dari artikel penelitian yang ada di perustakaan maupun hasil *download* dari *internet* untuk pembuatan proposal ini.
3. Pengumpulan data
Mengumpulkan semua data, data primer dan data sekunder di lokasi studi penelitian ataupun instansi terkait seperti : Pemerintah Desa/Kecamatan, Dinas PU Provinsi Sulawesi Utara, Balai Wilayah Sungai Sulawesi I, masyarakat setempat, dan lain-lain
4. Analisis dan pembahasan dari semua data yang diperoleh.
5. Kesimpulan dan saran

Bagan Alir Penelitian



Gambar 2. Diagram Alir desain Penelitian

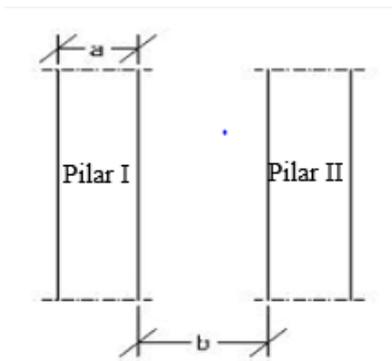
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Analisa Fisik

Pengukuran Dimensi Pilar

Pengukuran ini dilakukan untuk mengetahui dimensi pilar yang akan digunakan dalam penelitian.

Adapun skema pengukuran dimensi pilar adalah seperti gambar di bawah ini :



Gambar 3. Skema Pengukuran Pilar

Dari skema pengukuran diatas, didapat data dimensi pilar seperti pada tabel berikut :

Tabel 4. Dimensi pilar

Pengukuran Demensi Pilar (m)	
Diameter pilar (a)	1.2 m
jarak antar pilar (b)	3.8 m

Pengukuran Elevasi Dasar Sungai

Penampang sungai yang diukur adalah penampang memanjang sungai dan penampang melintang sungai untuk mendapatkan elevasi di dasar sungai.

Prosedur pengukuran penampang sungai sebagai berikut :

1. Menentukan titik di bagian hulu sungai sebagai titik datum pada alur sungai yang belum tergerus.
2. Sungai arah memanjang dibagi menjadi beberapa pias.
3. Tiap pias dibagi dalam beberapa titik dengan jarak masing-masing adalah 2 meter.
4. Mengukur elevasi dasar di setiap segmen pada pias yang telah dibagi menggunakan alat *theodolite* seperti pada gambar 5.
5. Data hasil pengukuran diolah untuk mendapatkan data pengukuran memanjang dan melintang dasar sungai.
6. Menggambar potongan melintang dan memanjang sungai untuk mendapatkan topografi dasar sungai di setiap pias.

Pembuatan skema pengukuran

Berdasarkan prosedur pengukuran yang telah diuraikan, maka dilanjutkan dengan membuat skema pengukuran terhadap peta situasi pada gambar di bawah ini :

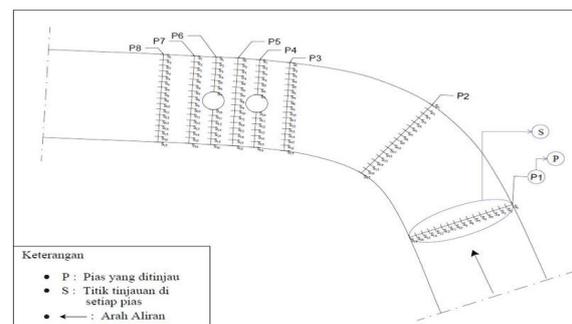


Gambar 4. Peta situasi pada daerah yang ditinjau

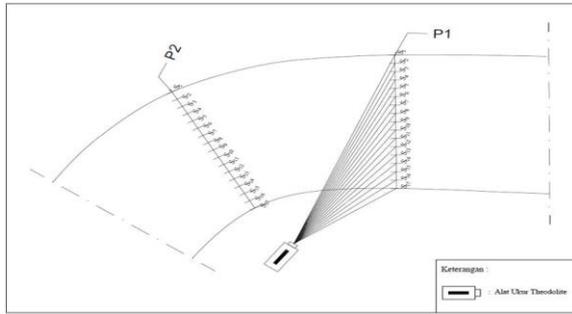
Dari peta situasi di atas, kemudian dibuat skema pengukuran elevasi seperti pada gambar 4 dan 5 dengan keterangan sebagai berikut :

- P adalah pias yang ditinjau pada alur sungai. S adalah titik tinjauan di setiap pias.
- Kedalaman rata-rata pada pias P₁ dijadikan sebagai titik datum yang terletak di hulu sungai.
- Titik P₁S₁ merupakan titik referensi (dinyatakan sebagai titik nol) untuk menghitung beda tinggi terhadap setiap titik yang ditinjau.
- Pier I terletak pada titik P₄ S₈. Pier II terletak pada 1,4 meter dari titik P₆ S₇.
- Jarak Pias P₁-P₂ : 20,8 meter, P₂-P₃ : 15.5 meter, P₃-P₄ : 3,5 meter, P₄-P₅ : 2.5 meter, P₅-P₆ : 2,5 meter, P₆-P₇ : 2,5 Meter, P₇-P₈ : 3,5 Meter.

Kemudian berdasarkan pengukuran yang telah dilakukan, didapat data hasil pengukuran elevasi dasar sungai dengan elevasi pada titik referensi (P₁S₁) adalah 67 m yang dapat dilihat pada tabel 5.



Gambar 5. Skema pengukuran elevasi dasar sungai

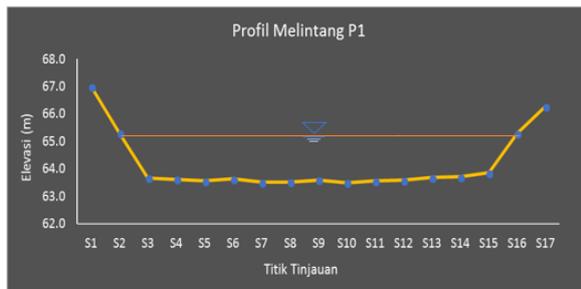


Gambar 6. Skema pengukuran elevasi dasar sungai dengan alat ukur *Theodolite*

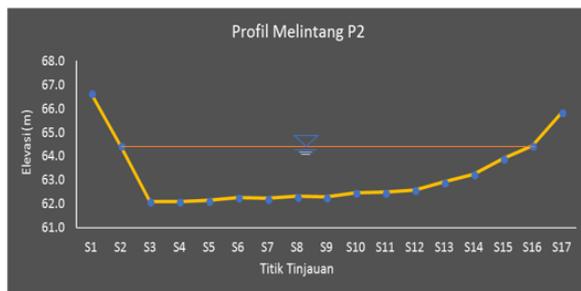
Tabel 5. Data hasil pengukuran elevasi dasar sungai dengan tinggi titik $P_1S_1 = 67$ m

Segmen	Pias (m)							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
S1	67	66.662	66.471	66.654	66.585	66.579	66.667	66.538
S2	65.298	64.452	64.687	64.673	64.686	64.698	64.678	64.702
S3	63.669	62.096	62.212	62.076	61.971	62.037	62.197	62.116
S4	63.624	62.102	62.128	62.103	61.952	62.029	62.115	61.971
S5	63.562	62.152	62.151	62.128	61.968	62.09	62.052	61.971
S6	63.639	62.274	62.084	62.115	61.951	62.072	62.047	61.956
S7	63.504	62.229	62.057	61.511	61.930	61.618	61.716	61.938
S8	63.525	62.321	61.986	61.571	61.577	61.543	61.694	61.719
S9	63.591	62.286	62.01	61.643	61.588	61.675	62.017	61.994
S10	63.498	62.470	61.791	61.780	61.924	62.083	62.031	62.008
S11	63.562	62.482	62.077	62.163	61.976	62.13	62.068	62.074
S12	63.589	62.595	62.054	62.287	62.185	62.256	62.184	62.208
S13	63.681	62.919	62.219	62.758	62.787	62.910	62.517	62.159
S14	63.708	63.245	62.907	63.536	63.438	63.587	63.141	62.462
S15	63.853	63.906	63.547	64.682	64.779	64.689	64.662	62.929
S16	65.290	64.446	64.679	65.763	66.076	65.875	66.096	64.708
S17	66.274	65.351	65.668	-	-	-	-	66.151
Lebar Sungai (m)	32.45	32.25 m	31.86 m	29.80 m	30.20 m	30.52 m	31.29 m	32.10 m

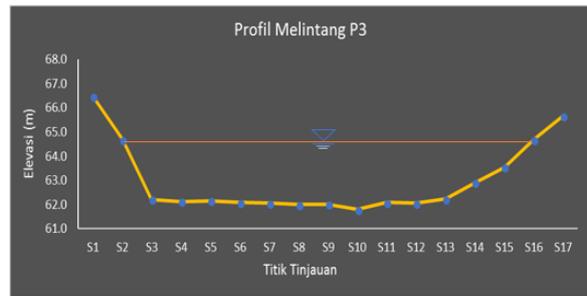
Berdasarkan data hasil pengukuran yang telah diolah, selanjutnya dibuat gambar profil melintang dan memanjang pada setiap pias yang ditinjau, sebagai berikut :



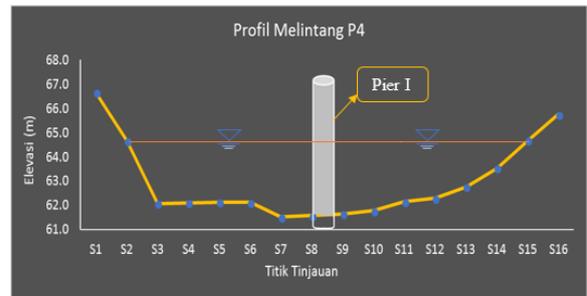
Gambar 7. Profil melintang pada Pias P_1



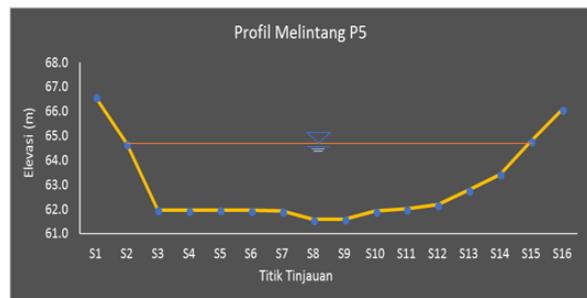
Gambar 8. Profil melintang pada Pias P_2



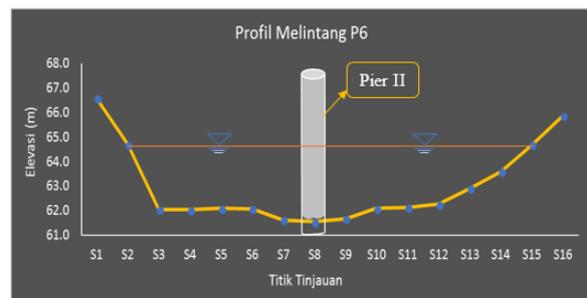
Gambar 9. Profil melintang pada Pias P_3



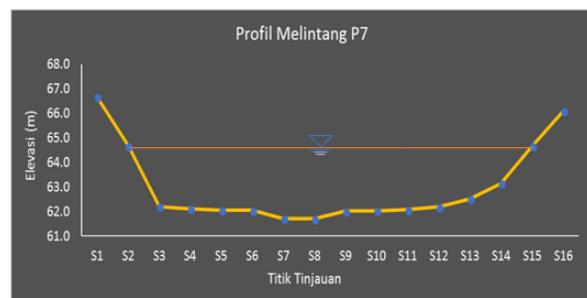
Gambar 10. Profil melintang pada Pias P_4



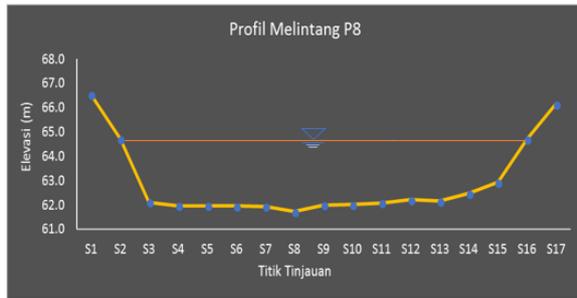
Gambar 11. Profil melintang pada Pias P_5



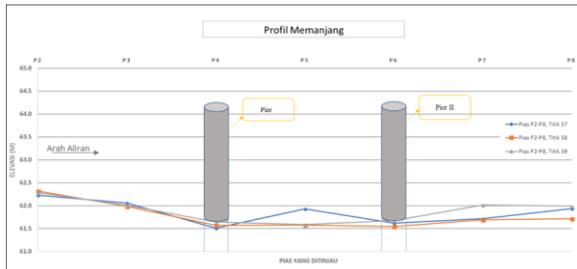
Gambar 12. Profil melintang pada Pias P_6



Gambar 13. Profil melintang pada Pias P_7



Gambar 14. Profil melintang pada Pias P₈



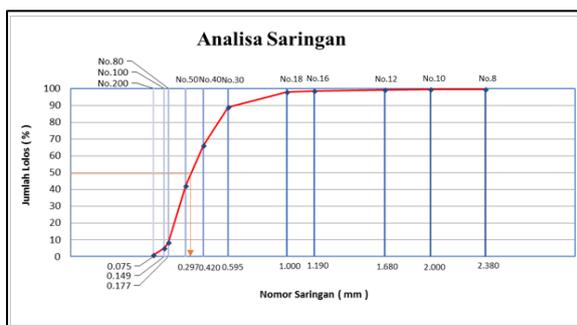
Gambar 15. Profil Memanjang pada Pias P₂ - P₈ di Titik S₇ - S₉

Analisa Ukuran Butiran Sedimen

Analisis ukuran butiran untuk mendapatkan diameter butiran (Standart ASTM) yang dibutuhkan sebagai parameter dalam perhitungan kedalaman gerusan. Variabel yang diamati adalah diameter ukuran partikel butiran rerata sedimen (D_{50}).

Tabel 6. Hasil analisa saringan sungai kuwil

Analisa Saringan (Sieve Analysis)									
Jenis Material : Pasir		Berat Sampel : 115 gr							
Asal : Sungai Kuwil									
ASTM (Inchi)	Metrik (mm)	Berat Saringan	Berat Saringan + Tertahan	Tertahan		Lolos		% Kumulatif	
				Berat (gr)	Persen (%)	Berat (gr)	Persen (%)	Tertahan	Lolos
8"	2.380	474.85	475.27	0.42	0.37	114.58	99.63	0.37	99.63
10"	2.000	462.56	462.74	0.18	0.16	114.40	99.48	0.16	99.48
12"	1.680	461.36	461.49	0.13	0.11	114.27	99.37	0.11	99.37
16"	1.190	442.68	443.68	1.00	0.87	113.27	98.50	0.87	98.50
18"	1.000	437.69	438.42	0.73	0.63	112.54	97.86	0.63	97.86
30"	0.595	410.33	420.68	10.35	9.00	102.19	88.86	9.00	88.86
40"	0.420	395.29	421.43	26.14	22.73	76.05	66.13	22.73	66.13
50"	0.297	388.12	415.79	27.67	24.06	48.38	42.07	24.06	42.07
80"	0.177	348.46	387.34	38.88	33.81	9.50	8.26	33.81	8.26
100"	0.149	351.06	354.93	3.87	3.37	5.63	4.90	3.37	4.90
200"	0.075	385.06	389.82	4.76	4.14	0.87	0.76	4.14	0.76
Pan	0	331.73	332.38	0.65	0.57	0.00	0.00	0.57	0.00
		$\Sigma =$		114.78					



Gambar 16. Grafik analisa saringan ukuran butiran

Dari hasil analisa ukuran butiran sedimen yang telah dilakukan, maka didapat nilai ukuran butiran rerata untuk D_{50} adalah 0,34 mm.

Analisa debit

Dalam penelitian ini debit yang akan digunakan dalam perhitungan kedalaman gerusan adalah debit puncak (*peak discharge*) yang dianalisa dengan program HEC-HMS. Stasiun pengamatan yang digunakan adalah stasiun Rumengkor, stasiun Winangun, stasiun Paleloan, dan stasiun Winangun dengan periode pencatatan tahun 2003 s/d 2015. Data hujan disajikan dalam tabel dibawah ini :

Tabel 7 Data curah hujan harian maksimum

Tahun	Curah Hujan Harian Maksimum (mm)			
	Sta. Paleloan	Sta. Rumengkor	Sta. Winangun	Sta. Noongan
2003	46,3	105,4	171	112
2004	58	79	105	100
2005	99	117,3	135,5	97
2006	50,2	72,6	124	88,1
2007	37,7	55,4	176,6	75,4
2008	45,1	82,1	162,3	57,6
2009	40	118,4	124,8	98,2
2010	67,2	104,5	137,3	10,8
2011	90,9	87,8	143	116,4
2012	69,8	111,5	155,9	94,8
2013	66,5	68	93,6	84,6
2014	110,5	183	186,6	100
2015	64,9	74,2	140	95

Sumber : Balai Wilayah Sungai Sulawesi I

Uji data outlier

Uji data outlier bertujuan untuk mencari data curah hujan yang menyimpang dari kumpulan datanya serta mengoreksi data tersebut ke batas tertinggi ataupun terendahnya. Berikut ini adalah syarat serta cara pengujian data outlier berdasarkan Koefisien *Skewness* ($C_s \log$).

- Jika $C_s \log \geq 0,4$ maka :
Uji data outlier tinggi, koreksi data, uji outlier rendah, koreksi data.
- Jika $-0,4 < C_s \log < 0,4$ maka :
Uji outlier tinggi atau rendah secara bersama-sama, koreksi data.
- Jika $C_s \log \leq -0,4$ maka :
Uji outlier rendah, koreksi data, uji outlier tinggi, koreksi data.

Setelah dilakukan uji outlier, maka data hasil pengujian outlier disajikan dalam tabel 8. berikut ini :

Tabel 8 Data hasil uji outlier

Tahun	Curah Hujan Harian Maksimum (mm)			
	Sta. Winangun	Sta. Rumengkor	Sta. Paleloan	Sta. Noongan
2003	171	105,4	46,3	112
2004	105	79	58	100
2005	135,5	117,3	99	97
2006	124	72,6	50,2	88,1
2007	176,6	55,4	37,7	75,4
2008	162,3	82,1	45,1	57,6
2009	124,8	118,4	40	98,2
2010	137,3	104,5	67,2	54,4
2011	143	87,8	90,9	116,4
2012	155,9	111,5	69,8	94,8
2013	93,6	68	66,5	84,6
2014	186,6	183	110,5	100
2015	140	74,2	64,9	95

Perhitungan Luas DAS dengan Metode Poligon Thiessen

Dalam penelitian ini metode poligon Thiessen digunakan untuk memberikan koreksi terhadap kedalaman hujan sebagai fungsi luas daerah yang mewakili.

Setelah melakukan poligon thiessen terhadap DAS penelitian maka didapat curah hujan yang mempengaruhi DAS tersebut berasal dari sta Paleloan, sta Noongan, dan sta Rumengkor.

Dari hasil analisis peta topografi dengan skala 1:50.000 diperoleh :

$$A_1 = \text{Luas daerah yang mewakili Stasiun Rumengkor} = 115,261 \text{ km}^2$$

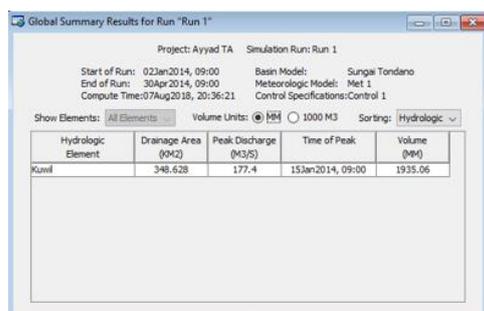
$$A_2 = \text{Luas daerah yang mewakili Stasiun Paleloan} = 125,065 \text{ km}^2$$

$$A_3 = \text{Luas daerah yang mewakili Stasiun Noongan} = 108,302 \text{ km}^2$$

$$\text{Luas total DAS} = 348,628 \text{ km}^2$$

Simulasi HEC-HMS

hasil analisa dengan menggunakan program HEC – HMS untuk debit puncak adalah 177,4 m³/det seperti pada gambar di bawah ini :



Gambar 17. Debit puncak di titik jembatan Kuwil

Kalibrasi Data Debit Terukur dan Debit terhitung Dengan Perbandingan Luas DAS

Kalibrasi model merupakan proses penyesuaian nilai-nilai parameter model sampai didapat hasil model yang sama atau mendekati hasil pengamatan. Untuk dapat menirukan perilaku aliran di dalam sistem DAS, model HEC-HMS memerlukan penyesuaian parameter model. Kalibrasi dilakukan terhadap parameter-parameter model dengan melakukan evaluasi kemiripan hasil simulasi dan data observasi. Kalibrasi parameter model HEC-HMS dengan cara memperkirakan parameter awal berdasarkan karakteristik DAS. Optimasi dilakukan dengan membandingkan debit hasil simulasi dengan debit observasi. Dari simulasi HEC-HMS didapat data debit terhitung yang kemudian akan dikalibrasi dengan data debit terukur. Disini perbandingan luas DAS yang digunakan diambil luas DAS Kairagi dan luas DAS Kuwil. Data debit terukur yang diperoleh dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Tabel 9 Data Debit Terukur Sungai Tondano Di Titik Jembatan Kairagi

Tgl	Januari	Tgl	Februari	Tgl	Maret	Tgl	April
	Debit Terukur (m ³ /dtk)						
1	24,7	1	20,0	1	19,7	1	19,2
2	24,7	2	19,0	2	19,7	2	20,5
3	24,7	3	19,0	3	21,9	3	20,5
4	26,2	4	19,2	4	22,2	4	19,2
5	27,7	5	19,2	5	19,2	5	19,0
6	29,3	6	19,5	6	19,7	6	19,2
7	32,5	7	19,2	7	19,7	7	19,7
8	31,5	8	19,2	8	19,7	8	20,5
9	34,2	9	19,5	9	19,7	9	21,9
10	41,0	10	18,7	10	19,7	10	23,3
11	37,7	11	19,0	11	19,2	11	19,2
12	34,2	12	19,2	12	19,2	12	19,2
13	33,2	13	19,5	13	19,2	13	19,2
14	35,3	14	21,9	14	20,0	14	20,5
15	216,1	15	21,6	15	21,9	15	21,9
16	86,3	16	19,2	16	23,3	16	19,2
17	53,4	17	22,2	17	23,3	17	19,5
18	34,2	18	21,9	18	19,2	18	20,0
19	27,7	19	23,3	19	21,9	19	20,5
20	27,7	20	23,3	20	20,5	20	19,2
21	27,7	21	19,2	21	19,2	21	19,2
22	28,0	22	19,5	22	24,7	22	24,1
23	24,7	23	19,7	23	24,7	23	24,1
24	24,7	24	19,2	24	20,5	24	23,3
25	24,7	25	21,9	25	20,5	25	21,9
26	24,7	26	20,5	26	19,2	26	21,9
27	24,7	27	19,2	27	19,2	27	23,3
28	24,7	28	19,2	28	19,7	28	21,9
29	26,2			29	20,5	29	19,2
30	24,7			30	20,5	30	20,5
31	24,7			31	19,7		

Sumber: Balai Wilayah Sungai Sulawesi Utara

Dengan rumus perbandingan sebagai berikut :

$$\frac{\text{Luas DAS Kuwil}}{\text{Luas DAS Kairagi}} \times Q (m^3/dtk)$$

Diketahui :

$$\text{Luas DAS Kairagi} = 362,106 \text{ km}^2$$

$$\text{Luas DAS Kuwil} = 348,628 \text{ km}^2$$

Sehingga, diperoleh :

$$\frac{348,628 \text{ km}^2}{362,106 \text{ km}^2} \times 24,7 (m^3/dtk) = 23,8 (m^3/dtk)$$

Hasil selengkapnya dari perhitungan perbandingan luas DAS terhadap data debit terhitung disajikan dalam tabel berikut ini :

Tabel 10 Hasil Data Debit Terukur Di Titik Kuwil dari Perhitungan Perbandingan Luas

Tgl	Januari		Februari		Maret		April	
	Debit Terukur (m3/dtk)	Tgl						
1	23.8	1	19.3	1	19.0	1	18.5	
2	23.8	2	18.3	2	19.0	2	19.8	
3	23.8	3	18.3	3	21.1	3	19.8	
4	25.2	4	18.5	4	21.3	4	18.5	
5	26.7	5	18.5	5	18.5	5	18.3	
6	28.2	6	18.8	6	19.0	6	18.5	
7	31.3	7	18.5	7	19.0	7	19.0	
8	30.4	8	18.5	8	19.0	8	19.8	
9	33.0	9	18.8	9	19.0	9	21.1	
10	39.5	10	18.0	10	19.0	10	22.4	
11	36.3	11	18.3	11	18.5	11	18.5	
12	33.0	12	18.5	12	18.5	12	18.5	
13	32.0	13	18.8	13	18.5	13	18.5	
14	33.9	14	21.1	14	19.3	14	19.8	
15	208.0	15	20.8	15	21.1	15	21.1	
16	83.1	16	18.5	16	22.4	16	18.5	
17	51.4	17	21.3	17	22.4	17	18.8	
18	33.0	18	21.1	18	18.5	18	19.3	
19	26.7	19	22.4	19	21.1	19	19.8	
20	26.7	20	22.4	20	19.8	20	18.5	
21	26.7	21	18.5	21	18.5	21	18.5	
22	27.0	22	18.8	22	23.8	22	23.2	
23	23.8	23	19.0	23	23.8	23	23.2	
24	23.8	24	18.5	24	19.8	24	22.4	
25	23.8	25	21.1	25	19.8	25	21.1	
26	23.8	26	19.8	26	18.5	26	21.1	
27	23.8	27	18.5	27	18.5	27	22.4	
28	23.8	28	18.5	28	19.0	28	21.1	
29	25.2			29	19.8	29	18.5	
30	23.8			30	19.8	30	19.8	
31	23.8			31	19.0			

Hasil kalibrasi menunjukkan nilai NSE yang memenuhi yaitu 0.362, dimana kriteria nilai NSE terdapat pada tabel berikut:

Tabel 11 Kriteria nilai Nash Sutcliffe Efficiency

NSE > 0,75	Baik
0,36 < NSE < 0,75	Memenuhi
NSE < 0,36	Tidak Memenuhi

Sumber: Motovilov, et al, 1999

Hasil perhitungan dengan metode diatas menyatakan bahwa korelasi atau hubungan data debit terukur dan debit terhitung adalah memenuhi, sehingga kedua data tersebut boleh digunakan untuk analisis selanjutnya.

Analisa Gerusan Lokal Berdasarkan Metode Empiris

Perhitungan gerusan lokal dalam penelitian ini menggunakan 3 metode empiris yaitu metode Laursen dan Toch, metode Froehlich dan metode Colorado State University (CSU) untuk mengetahui kedalaman gerusan di sekitar pilar jembatan.

Perhitungan Gerusan Lokal dengan Metode Laursen dan Toch

Persamaan yang digunakan dalam metode ini adalah sebagai berikut :

$$D_s = 1.35 b^{0.7} y^{0.3}$$

Dengan data-data sebagai berikut :

- Lebar pilar (b) = 1,2 m
- Kedalaman (y) = 1,616 m

Hasil perhitungan dengan menggunakan metode Laursen dan Toch :

$$D_s = 1.35 b^{0.7} y^{0.3} = 1.35 \times 1.2^{0.7} \times 1.616^{0.3} = 1,77 \text{ m}$$

Perhitungan Gerusan Lokal dengan Metode Froehlich

Persamaan yang digunakan dalam metode ini adalah sebagai berikut :

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

Dengan data-data sebagai berikut :

- Bilangan Froude (Fr) = 0,85
- Kedalaman (y) = 1,616 m
- Lebar pilar (b) = 1,2 m
- Panjang pilar (l) = 6,2 m
- Sudut aliran (b') = 1,2
- Ukuran partikel butiran rerata (D_{50}) = 0,34 mm
- Koefisien jenis pilar (K) = 1 (Pilar bulat dan berujung bulat)

Hasil perhitungan dengan menggunakan metode Froehlich :

$$d_s = 0,32 b K \left(\frac{b'}{b}\right)^{0,02} \left(\frac{y}{b}\right)^{0,46} Fr^{0,2} \left(\frac{b}{D_{50}}\right)^{0,08} + 1,0 = 0.32 \times 1.2 \times 1 \times 1.147 \times 0.968 \times 1.106 + 1.0 = 1.471 \text{ m}$$

Perhitungan Gerusan Lokal dengan Metode Colorado State University (CSU)

Persamaan yang digunakan dalam metode ini adalah sebagai berikut :

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

Dengan data-data sebagai berikut :

- Bilangan Froude (Fr) = 0,85
- Lebar pilar (b) = 1,2 m
- Kedalaman (y) = 1.616 m
- Koefisien bentuk pilar (K_1) = 1,0 (tabel 1)
- Koefisien sudut aliran (K_2) = 1,0 (Tabel 2)
- Koefisien kondisi dasar saluran (K_3) = 1,1 (Tabel 3)

Hasil perhitungan dengan menggunakan metode Colorado State University (CSU) :

$$d_s = 2.0 y K_1 K_2 K_3 \left(\frac{b}{y}\right)^{0.65} Fr^{0.43}$$

$$= 2.0 \times 1.616 \times 1 \times 1 \times 1.1 \times 0.824 \times 0.932$$

$$= 2.73 \text{ m}$$

Kedalaman Gerusan

Kedalaman Gerusan Di sekitar Pilar

Kedalaman gerusan yang ditinjau pada penelitian ini adalah kedalaman gerusan yang terjadi di sekitar pilar yaitu pada pias P₄, P₅, dan P₆ dimana posisi pilar I terletak pada pias P₄ dan pilar II terletak pada pias P₆. Pias P₅ berada di antara pilar I dan pilar P II.

Hasil perhitungan kedalaman gerusan di sekitar pilar dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 12 Kedalaman gerusan di sekitar pilar

Kedalaman Gerusan (Ds)					
Pias	Titik Tinjauan				
	S6	S7	S8	S9	S10
P ₄	- 0.94 m	- 1.55 m	- 1.49 m	- 1.41 m	- 1.28 m
P ₅	- 1.12 m	- 1.14 m	- 1.49 m	- 1.48 m	- 1.15 m
P ₆	- 1.01 m	- 1.46 m	- 1.54 m	- 1.41 m	- 1.00 m

Kedalaman Gerusan Maksimum

Dari tabel di atas dapat diketahui besaran kedalaman gerusan maksimum yang terjadi pada pias P₄, P₅ dan P₆, sebagai berikut :

- Pias P₄ = 1,55 meter
- Pias P₅ = 1,49 meter
- Pias P₆ = 1,54 meter

Berdasarkan uraian di atas, kedalaman gerusan maksimum yang terjadi di sekitar pilar terletak pada pada pias P₄ dengan titik tinjauan S₉ yaitu 1,55 meter.

Kesesuaian Formula

Untuk mengetahui formula atau metode yang dapat dipakai dalam perhitungan kedalaman gerusan di suatu lokasi maka harus dilakukan penelitian untuk mengetahui kesesuaian formula dan hasil pengukuran secara langsung di lapangan. Hal ini disebabkan karena setiap metode yang digunakan dalam perhitungan kedalaman gerusan terdapat parameter-parameter yang berbeda antar satu metode dengan metode lainnya.

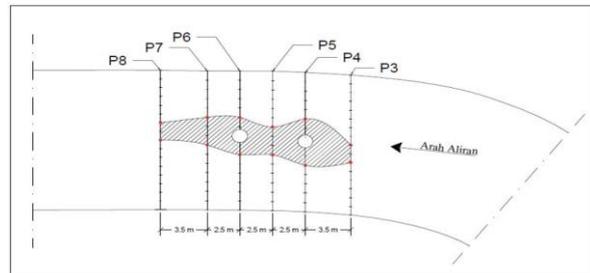
Dari hasil analisa fisik dan analisa dengan menggunakan metode empiris maka dibuat rekapitulasi hasil analisa fisik dan metode empiris seperti pada tabel 13 berikut ini :

Tabel 13 Rekapitulasi analisa fisik dan metode empiris

Kedalaman Gerusan (Ds)								
Pias	Fisik					Metode Empiris		
	Titik					Laursen dan Toch	Froehlich	CSU
S6	S7	S8	S9	S10				
P ₄	0.94 m	1.55 m	1.49 m	1.41 m	1.28 m	1.77 m	1.471 m	2.73 m
P ₅	1.12 m	1.44 m	1.49 m	1.48 m	1.15 m			
P ₆	1.01 m	1.46 m	1.54 m	1.41 m	1.00 m			

Pola Gerusan

Dari hasil pengukuran elevasi dasar sungai yang telah dilakukan pada tiap pias, dapat digambar pola gerusan yang terjadi di sekitar pilar seperti pada gambar di bawah ini :



Gambar 18. Pola gerusan di sekitar pilar jembatan

PENUTUP

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa fisik dan analisa menggunakan metode empiris tentang gerusan lokal pada pilar jembatan, maka kesimpulan yang diperoleh adalah sebagai berikut :

1. Pola Gerusan

Dari hasil analisa fisik menunjukkan bahwa pola gerusan yang terjadi di sekitar pilar jembatan mempunyai pola yang memanjang ke arah hilir dengan panjang, lebar dan kedalaman yang berbeda pada setiap pias yang ditinjau.
2. Kedalaman Gerusan
 - Berdasarkan hasil analisa fisik dapat dilihat bahwa kedalaman gerusan yang lebih dominan berada pada sisi sebelah kanan pilar dari arah hulu, hal ini disebabkan karena adanya pengaruh tikungan pada sungai.
 - Gerusan maksimum terjadi pada sisi sebelah kanan di pilar I dari arah hulu yaitu pada pias P₄ di titik tinjauan S₇ dengan nilai gerusan 1,55 meter.
3. Kesesuaian Formula

Dari hasil Rekapitulasi pengukuran langsung dilapangan dan analisa dengan menggunakan

metode empiris, yang dalam hal ini metode yang digunakan yaitu metode Laursen dan Toch, Froehlich dan Colorado State University (CSU) dapat dilihat bahwa kedalaman gerusan yang paling mendekati hasil pengukuran langsung di lapangan adalah perhitungan menggunakan metode Froehlich.

Saran

1. Untuk penelitian lanjutan, perlu dilakukan penelitian dengan eksperimen di laboratorium dan analisis gerusan lokal dengan menggunakan program HEC-RAS.
2. Perlu dilakukan juga penelitian mengenai cara penanggulangan gerusan di sekitar pilar.

DAFTAR PUSTAKA

- Aisyah, S., 2004. *Pola Gerusan Lokal di Berbagai Bentuk Pilar Akibat Adanya Variasi Debit*, Tugas Akhir, UGM : Yogyakarta.
- Breuser, H. N. C. and Raudviki. A.J., 1991. *Scouring*, IAHR Hydraulic Structure Design Manual, Rotterdam : AA Balkema.
- Froehlich, D.C., 1988. *Analysis of Onsite Measurement of Scours at Piers*, Hydraulics Engineering – Proceedings of 1988 National Conference, American Society of Civil Engineering, p. 534-539.
- Halim, F., 2014. *Pengaruh Debit Terhadap Pola Gerusan di Sekitar Abutmen Jembatan*. Jurnal Ilmiah Media Engineering, Vol.4, No 1:32-40. Universitas Sam Ratulangi, Manado.
- Indra Purwo., 2002. *Pola Gerusan Lokal Pada Pilar Jembatan dengan Variasi Sudut Posisi Pilar terhadap Arah Arus*, Tugas Akhir, UGM : Yogyakarta.
- Laursen, E. M. dan Toch., 1956. *Scour Around Bridge Piers and Abutments*, Iowa Highway, Res Board, Buletin No.4. 60. PP.
- Mawey, G. P., 2010. *Pola Gerusan di Sekitar Pier Jembatan Akibat bentuk Pier (Uji Laboratorium Dengan Skala Model Jembatan Megawati)*, Universitas Sam Ratulangi, Manado.
- Miller, W., 2003. *Model For The Time Rate Of Local Sediment Scour At A Cylindrical Structure*, Disertasi, PPS Universitas Florida : Florida.
- Richardson, E.V., Simons, D.B. dan Julien, P.Y., 1990. *Highway in the River Environment*, Federal Highway Administration Publication FHWA – HI 90 – 106. 719p.
- Sucipto dan Nur Kudus., 2004. *Analisis Gerusan Lokal di Hilir Bed Protection*, Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan, Vol. 6, No. 1. UNNES : Semarang.
- Tri Achmadi, 2001. *Model Hidraulik Gerusan Pada Pilar Jembatan*, Tesis, Universitas Diponegoro : Semarang.
- Triatmodjo Bambang. 2008, *Hidrologi Terapan*, Beta Offset Yogyakarta.