

SKRIPSI

**ANALISIS KECEPATAN ALIRAN TERHADAP GERUSAN
LOKAL DI SEKITAR PILAR JEMBATAN SUNGAI PAPPAS**



DONI PRADANA
105 81 11090 16

NUR AFIFAH KHUMAIRAH
105 81 11117 16

**PROGRAM STUDI TEKNIK PENGAIRAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR
2021**

SKRIPSI

ANALISIS PENGARUH KECEPATAN ALIRAN TERHADAP GERUSAN LOKAL DI SEKITAR PILAR JEMBATAN SUNGAI PAPPA'

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Guna Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah

Makassar

Disusun dan diajukan oleh:

DONI PRADANA
105 81 11090 16

NUR AFIFAH KHUMAIRAH
105 81 11117 16

PROGRAM STUDI TEKNIK PENGAIRAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR
2021



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR

FAKULTAS TEKNIK

GEDUNG MENARA IQRA LT. 3

Jl. Sultan Alauddin No. 259 Telp. (0411) 866 972 Fax (0411) 865 588 Makassar 90221

Website : www.unismuh.ac.id, e-mail : unismuh@gmail.com

Website : <http://teknik.unismuh.makassar.ac.id>

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

PENGESAHAN

Skripsi atas nama **Doni Pradana** dengan nomor induk Mahasiswa 105 81 11090 16 dan **Nur Afifah Khumairah** dengan nomor induk Mahasiswa 105 81 11117 16, dinyatakan diterima dan disahkan oleh Panitia Ujian Tugas Akhir/Skripsi sesuai dengan Surat Keputusan Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar Nomor : 0009/SK-Y/22201/091004/2021, sebagai salah satu syarat guna memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Pengairan Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar pada hari Kamis tanggal 15 Juli 2021.

5 Dzulhijjah 1442 H

Makassar,

15 Juli 2021 M

Panitia Ujian:

1. Pengawas Umum

a. Rektor Universitas Muhammadiyah Makassar

Prof. Dr. H. Ambo Asse, M.Ag

b. Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, MT

2. Penguji:

a. Ketua : Dr. Ir. Hj. Nurnawaty, ST., MT., IPM

b. Sekertaris : Fauzan Hamdi, ST., MT., IPM

3. Anggota: 1. Dr. Eng. Mukhsan Putra Hatta, ST, MT

2. Dr. Ir. Hj. Sukmasari Antaria, M.Si

3. Muh. Syafaat S Kuba, ST., MT

Mengetahui:

Pembimbing I

Pembimbing II

Dr. Ir. Muh. Yunus Ali, ST., MT., IPM

Kasmawati, ST., MT

Dekan Fakultas Teknik

Dr. Ir. Hj. Nurnawaty, ST., MT., IPM

NBM : 795 108

ANALISIS PENGARUH KECEPATAN ALIRAN TERHADAP GERUSAN LOKAL DI SEKITAR PILAR JEMPATAN SUNGAI PAPPAN

¹Doni Pradana, ²Nur Afifah Khumairah

Email : doni.pradana333@gmail.com Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar

Email : iinnhurakh28@gmail.com Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar

ABSTRAK

Morfologi sungai merupakan salah satu faktor yang menentukan dalam proses terjadinya gerusan. Proses penggerusan yang terjadi dapat diakibatkan karena kondisi morfologi sungai dan adanya bangunan sungai seperti pilar jembatan yang menghalangialiran. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh kecepatan aliran terhadap gerusan lokal di sekitar pilar jembatan. Penelitian ini menggunakan metode empiris dilakukan untuk mengetahui besarnya kedalaman gerusan. Bentuk pilar yang dianalisis adalah pilar tipe lenticular atau pilar kapsul dengan lebar pilar 1 m.

Hasil penelitian pengaruh kecepatan aliran terhadap gerusan lokal dengan perhitungan menggunakan metode empiris yang untuk kedalaman gerusan (ds) : metode Laursen dan Toch = 1,56 m, dan metode Colorado State University (CSU) = 1,95 m.

Kata kunci : Gerusan Lokal, Kecepatan Aliran, Sungai

ABSTRACT

River morphology is one of the determining factors in the process of scouring. The grinding process that occurs can be caused by the morphological conditions of the river and the presence of river buildings such as bridge pillars that block the flow. This study aims to determine the effect of flow velocity on scouring around the bridge pillars. This study uses empirical methods to determine the magnitude of the scour depth. The shape of the pillars analyzed is a lenticular pillar or a capsule pillar with a pillar width of 1 m.

The results of the research on the effect of flow velocity on local scour with calculations using empirical methods for scour depth (ds): Laursen and Toch method = 1.56 m, and Colorado State University (CSU) method = 1.95 m.

Keywords: local scour, empirical method, river

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Rabbil Alamin, segala puji bagi ALLAH SWT yang atas berkat limpahan rahmat, taufik serta inayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul **“Analisis Kecepatan Aliran Terhadap Gerusan Lokal Di Sekitar Pilar Jembatan Sungai Pappa”** sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana di Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar. Salam dan shalawat senantiasa tercurah kepada junjungan kita Nabi Besar Muhammad SAW sebagai suri tauladan untuk seluruh umat manusia.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa selesainya skripsi ini adalah berkat bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu dalam kesempatan ini, penulis menyampaikan terima kasih serta penghargaan yang setinggi-tingginya kepada :

1. Kedua Orang Tua kami yang selalu memberi dukungan secara moral maupun materi dan doa kepada kami.
2. Bapak Dr. Ir. Hj. Nurnawaty, ST., MT., IPM. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.
3. Bapak Andi Makbul Syamsuri, ST., MT., IPM selaku Ketua Prodi Sipil Pengairan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.
4. Bapak Muh. Amir Zainuddin, ST., MT., IPM selaku Sekretaris Prodi Sipil Pengairan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.
5. Bapak Dr. Ir. Muh. Yunus Ali, ST., MT., IPM. selaku Dosen Pembimbing Satu (1), yang selalu membimbing serta memberi arahan dalam penyusunan tugas akhir ini.

6. Ibu Kasmawati, ST., MT. selaku Dosen Pembimbing Dua (2), yang selalu membimbing serta memberi arahan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
7. Bapak dan Ibu Dosen serta para staf administrasi pada Jurusan Teknik Sipil Pengairan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.
8. Saudara/saudari kami di Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil Pengairan, PROYEKSI 2016 khususnya kelas Sipil C yang selalu memberikan doa serta dukungan kepada kami dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Serta semua pihak yang telah membantu kami. Selaku manusia biasa tentunya kami tak luput dari kesalahan. Oleh karena itu, saran dan kritik yang konstruktif sangat diharapkan demi penyempurnaan skripsi ini.

“Billahi Fii Sabilil Haq Fastabiqul Khaerat”.

Makassar, 26 Juni 2021

Tim Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR PERSAMAAN	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR NOTASI	ix
 BAB I PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	3
C. Tujuan Penelitian	3
D. Manfaat Penelitian	3
E. Batasan Masalah	4
F. Sistematika Penulisan	4
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
A. Sungai	6
1. Pengertian Sungai	6
2. Aliran Sungai	7
B. Gerusan	14
1. Pengertian Gerusan	14
2. Tipe Gerusan	15
3. Gerusan Lokal Pada Sungai	18
C. Pilar Jembatan	22
1. Pengertian Pilar Jembatan	22
2. Bentuk dan Ukuran Pilar Jembatan	23
3. Posisi Pilar	24
D. Matriks Penelitian Terdahulu	25
 BAB III METODE PENELITIAN	
A. Lokasi dan Waktu Penelitian	30
B. Jenis Penelitian dan Sumber Data	31
1. Jenis Penelitian	31
2. Sumber Data	31
C. Rancangan Model Penelitian	31
1. Alat Penelitian	32
D. Variabel Penelitian	35
1. Variabel Bebas	35
2. Variabel Terikat	35
E. Prosedur Penelitian	35
F. Analisis Data	36

G. Bagan Alur Penelitian	38
--------------------------------	----

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil	39
1. Kedalaman Hidrolis	39
2. Luas Penampang	41
3. Kecepatan Aliran	44
4. Debit	47
5. Karakteristik Aliran	48
6. Perhitungan Gerusan Lokal (d_s) dengan Pendekatan Empiris	52
a. Perhitungan Gerusan Lokal Dengan Menggunakan Metode Laursen Dan Toch	52
b. Perhitungan Gerusan Lokal Dengan Menggunakan Metode Colorado State University (CSU)	54
7. Pengaruh kecepatan aliran (V) terhadap gerusan (D_s)	58
8. Pengaruh bilangan froud (Fr) terhadap gerusan (D_s)	59
B. Pembahasan Hasil Penelitian	61
1. Pengaruh Kecepatan Aliran (V) Terhadap Gerusan Lokal Di Sekitar Pilar Jembatan	61
2. Pengaruh Karakteristik Aliran (V) Terhadap Gerusan Lokal Di Sekitar Pilar Jembatan	62

BAB V PENUTUP

A. Kesimpulan	64
B. Saran	65

DAFTAR PUSTAKA	66
LAMPIRAN	

Daftar Persamaan

Persamaan 1	Debit (Q).....	9
Persamaan 2	Bilangan Froude (Fr).....	13
Persamaan	Gaya Gravitasi (g).....	13
Persamaan 3	Kecepatan Aliran (V).....	13
Persamaan 4	Luas Penampang (A).....	14
Persamaan	Ketinggian (H).....	14
Persamaan	Lebar Saluran (B).....	14
Persamaan 5	Gerusan (ds) Laursen dan Toch.....	19
Persamaan 6	Gerusan (ds) Colorado State University (CSU).....	19



Daftar Gambar

Gambar 1	Hubungan Kedalaman Gerusan Dengan Waktu.....	17
Gambar 2	Mekanisme Gerusan Akibat Pola Aliran	21
Gambar 3	Koefisien Arah Sudut Aliran	24
Gambar 4	Lokasi Penelitian.....	30
Gambar 5	Flow Watch	32
Gambar 6	Bola Pimpong.....	32
Gambar 7	Stopwatch.....	33
Gambar 8	Meteran	33
Gambar 9	Tali	34
Gambar 10	Kamera	34
Gambar 11	Bagan Alur Penelitian	38
Gambar 12	Grafik Perbandingan antara kedalaman aliran pada jarak tinjau 5, 10 dan 15 meter di hulu pilar.	39
Gambar 13	Grafik kecepatan aliran menggunakan current meter	41
Gambar 14	Grafik kecepatan aliran menggunakan bola	44
Gambar 15	Grafik bilangan Froude (fr) menggunakan current meter	48
Gambar 16	Grafik bilangan Froude (fr) menggunakan bola	48
Gambar 17	Grafik kedalaman gerusan 5, 10 dan 15 m dari hulu pilar.....	50
Gambar 18	Grafik kedalaman gerusan 5, 10 dan 15 m dari hulu pilar.....	54
Gambar 19	Grafik pengaruh kecepatan aliran (V) terhadap Kedalaman gerusan	56
Gambar 20	Hubungan antara bilangan froude (fr) dengan kedalaman gerusan (D_s).....	57

Daftar Tabel

Tabel 1	Koefisien koreksi terhadap bentuk pilar (K_1)	20
Tabel 2	Koefisien koreksi terhadap sudut aliran (K_2)	20
Tabel 3	Koefisien koreksi terhadap kondisi dasar saluran (K_3)	20
Tabel 4	Matriks penelitian terdahulu.....	26
Tabel 5	Kedalaman jarak tinjau 5, 10 dan 15 meter di depan pilar.....	39
Tabel 6	Hasil perhitungan luas penampang pada pada jarak tinjau 5 meter depan pilar.....	41
Tabel 7	Hasil perhitungan luas penampang pada pada jarak tinjau 10 meter depan pilar.....	42
Tabel 8	Hasil perhitungan luas penampang pada pada jarak tinjau 15 meter depan pilar.....	43
Tabel 9	Kecepatan aliran (V) dengan jarak tinjau 5, 10 dan 15 meter depan pilar.....	45
Tabel 10	Debit Jarak tinjau 5 m.....	47
Tabel 11	Bilangan froude 5 meter di hulu pilar.....	49
Tabel 12	Kedalaman gerusan metode Laursen dan Toch.....	52
Tabel 13	Kedalaman gerusan metode metode Colorado State University (Csu).....	55
Tabel 14	Pengaruh kecepatan aliran (v) terhadap kedalaman gerusan (ds) ..	58
Tabel 15	Hubungan antara bilangan froude (fr) dengan Kedalaman gerusan (ds)	59

Daftar Notasi

Notasi 1 Debit (Q)	10
Notasi 2 Kecepatan Aliran (V)	10
Notasi 3 Luas Penampang (A)	10
Notasi 4 Bilangan Froude (Fr)	14
Notasi 5 Gaya Gravitasi (g)	14
Notasi 6 Kedalaman (H)	14
Notasi 7 Lebar Saluran (B)	14
Notasi 8 Kedalaman Gerusan (ds)	20
Notasi 9 lebar pilar (b)	20
Notasi 10 Koefisien bentuk pilar (K_1)	20
Notasi 11 Koefisien sudut aliran (K_2)	20
Notasi 12 Koefisien kondisi dasar saluran (K_3)	20



BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Sungai merupakan suatu saluran terbuka dengan ukuran geometrik yaitu penampang melintang, profil memanjang dan kemiringan lembah yang terbentuk secara alami di permukaan bumi dan dapat berubah seiring waktu tergantung debitnya, material dasar dan tebingnya. Sungai menjadi salah satu sumber daya alam utama yang dijadikan oleh masyarakat sebagai kebutuhan perdagangan maupun kebutuhan rumah tangga. Namun berbagai aktivitas yang terjadi di dalam sungai secara terus menerus dalam waktu yang lama akan memberi dampak terhadap bangunan air di sekitar aliran. Seperti terjadinya gerusan di sekitar pilar jembatan yang dipengaruhi oleh kecepatan aliran.

Pada perencanaan ruas jalan untuk transportasi darat, melintasi suatu alur sungai tentu tidak dapat dielakkan. Sehingga dibutuhkan konstruksi jembatan. Salah satu struktur utama bawah jembatan yang berhubungan langsung dengan aliran sungai adalah pilar jembatan. Adanya bangunan pilar jembatan menyebabkan perubahan karakteristik aliran seperti aliran berubah menjadi aliran spiral atau turbulen, perubahan kecepatan aliran, yang menimbulkan perubahan dasar sungai yang terjadinya gerusan

lokal (local scouring). Hal inilah menjadi penyebab kerusakan pada pilar jembatan.

Proses terjadinya gerusan biasanya berlangsung secara bertahap sedikit demi sedikit namun dalam jangka waktu yang lama. Proses ini akan terlihat lebih nyata dan jelas pada saat terjadi banjir besar, hal ini didasari karena saat terjadi banjir debit air akan meningkat sehingga fluktuasi air tidak lagi dapat diprediksi.

Banyak kasus runtuhnya bangunan jembatan bukan hanya disebabkan oleh faktor konstruksi namun juga persoalan gerusan di sekitar pilar bisa menjadi faktor lain, ini ditunjukkan karena adanya proses gerusan yang terjadi secara terus menerus di sekitar pilar sehingga terjadi penurunan (degradasi) dasar sungai di sekitar pilar.

Berdasarkan latar belakang di atas, kajian tentang gerusan lokal (local scouring) di sekitar pilar jembatan akibat pengaruh kecepatan aliran pada sungai perlu mendapat perhatian, sehingga nantinya dapat diketahui pola gerusan serta upaya dalam pengendalian dan pencegahan gerusan lokal di sekitar pilar jembatan.

Maka kami akan melakukan suatu penelitian **"ANALISIS PENGARUH KECEPATAN ALIRAN TERHADAP GERUSAN LOKAL DI SEKITAR PILAR JEMBATAN SUNGAI PAPPAL" .**

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh kecepatan aliran terhadap gerusan lokal di sekitar pilar jembatan ?
2. Bagaimana pengaruh karakteristik aliran terhadap gerusan lokal di sekitar pilar ?

C. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Untuk mengetahui bagaimana pengaruh kecepatan aliran terhadap gerusan lokal yang terjadi di sekitar pilar jembatan.
2. Untuk mengetahui pengaruh karakteristik aliran terhadap gerusan yang terjadi di sekitar pilar.

D. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberi manfaat dalam pengembangan ilmu pengetahuan khususnya dalam bidang hidrolika yang ada kaitannya dengan konsep gerusan lokal.
2. Sebagai sumber informasi dan referensi yang diharapkan dapat digunakan bagi para konsultan perencana dalam kaitannya dengan perencanaan bangunan air.

3. Hasil penelitian ini juga diharapkan dapat dijadikan sebagai informasi tambahan untuk pengembangan penelitian lebih lanjut terkait adanya kerusakan pada pilar jembatan akibat terjadinya gerusan lokal.

D. Batasan Masalah

Dalam memberikan penjelasan dari permasalahan guna memudahkan dalam menganalisa, maka terdapat batasan masalah yang diberikan pada penulisan tugas akhir ini mengenai Analisis Pengaruh Kecepatan Aliran Terhadap Gerusan Lokal di Sekitar Pilar Jembatan, terdiri dari :

1. Jenis saluran yang digunakan adalah model saluran terbuka (Sungai).
2. Penelitian ini menganalisis pilar yang sesuai di lapangan.
3. Struktur dan beban pada pilar jembatan tidak diperhitungkan.

E. Sistematika Penulisan

Susunan dari sistematika dalam proposal ini dapat diuraikan sebagai berikut :

1. Bab I PENDAHULUAN

Berisi tentang latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

2. Bab II KAJIAN PUSTAKA

Mencakup teori-teori yang berkaitan dengan permasalahan yang diperlukan dalam melakukan penelitian ini, meliputi teori tentang gerusan

lokal (lokal scouring), kecepatan aliran, karakteristik aliran, kedalaman gerusan.

3. Bab III METODE PENELITIAN

Berisi tentang metode penelitian yang terdiri atas waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan, prosedur penelitian, serta bagan alur penelitian.

4. Bab IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi tentang hasil penelitian yang menguraikan tentang analisis mengenai pengaruh kecepatan aliran terhadap gerusan lokal yang terjadi di sekitar pilar jembatan.

5. Bab V PENUTUP

Berisi kesimpulan dari hasil penelitian ini serta saran yang oleh penulis untuk penelitian kedepannya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Sungai

1. Pengertian Sungai

Sungai merupakan suatu saluran terbuka atau saluran drainase yang terbentuk secara alami di permukaan bumi dengan ukuran geometrik yaitu penampang melintang, profil memanjang dan kemiringan lembah yang berubah seiring waktu tergantung pada debit, material dasar dan tebing. Sungai menjadi salah satu sumber daya alam utama yang dijadikan oleh masyarakat sebagai kebutuhan perdagangan maupun kebutuhan rumah tangga.

Sungai atau saluran terbuka menurut Bambang Triatmodjo (1993) dalam Afdal, M & Haq, Emil (2020) adalah saluran dimana air mengalir dengan muka air bebas. Pada saluran terbuka, misalnya sungai (saluran alam), variabel aliran sangat tidak teratur terhadap ruang dan waktu. Saluran yang mengalirkan air dengan suatu permukaan bebas disebut saluran terbuka, menurut asalnya saluran dapat digolongkan menjadi saluran alam (natural) dan saluran buatan (artificial) (Chow, V. T, 1992 dalam Afdal, M & Haq, Emil. 2020).

Aliran air dalam suatu saluran dapat berupa aliran saluran terbuka (open channel flow) dan saluran tertutup (pipe flow). Aliran saluran terbuka harus memiliki permukaan bebas (free surface), sedangkan aliran pipa atau tertutup tidak demikian, karena air harus mengisi seluruh saluran. Permukaan bebas dipengaruhi oleh tekanan udara. Aliran pipa yang terkurung dalam saluran tertutup, tidak terpengaruh langsung oleh tekanan udara, kecuali oleh tekanan hidrolik.

Aliran melalui saluran terbuka dianggap seragam (uniform) apabila berbagai variabel aliran seperti kedalaman, tampang basah, kecepatan, dan debit pada setiap tampang saluran terbuka adalah konstan. Aliran melalui saluran terbuka disebut tidak seragam atau berubah (non uniform flow atau varied flow), apabila variabel aliran seperti kedalaman, tampang basah, kecepatan di sepanjang saluran tidak konstan.

Apabila perubahan aliran terjadi pada jarak yang pendek maka disebut aliran berubah cepat, sedang apabila terjadi pada jarak yang panjang disebut aliran berubah tidak beraturan.

2. Aliran Sungai

Aliran disebut mantap apabila variabel aliran di suatu titik seperti kedalaman dan kecepatan tidak berubah terhadap waktu, dan apabila berubah terhadap waktu disebut aliran tidak mantap.

1) Alur Sungai

Ada tiga bagian alur sungai menurut Daries (2012) dalam Sanjaya (2017), diantaranya :

- a. Bagian Hulu, memiliki kemiringan lereng yang besar lebih dari 15%, sehingga hulu menjadi daerah yang rentan mengalami erosi. Pada bagian hulu memiliki kecepatan aliran yang lebih besar dari pada bagian hilir, sehingga pada alur ini saat terjadi banjir tidak hanya partikel sedimen halus saja yang terangkut akan tetapi juga pasir, kerikil bahkan batu.
- b. Bagian Tengah, adalah daerah peralihan bagian hulu dan hilir. Pada bagian ini memiliki kemiringan dasar sungai yang landai sehingga kecepatan aliran lebih kecil daripada bagian hulu. Selain itu, bagian ini merupakan daerah keseimbangan proses sedimentasi dan proses erosi yang sangat beragam dari setiap musim.
- c. Bagian Hilir, Kecepatan aliran pada bagian hilir relative lambat karena melalui dataran yang mempunyai kemiringan yang landai. Hal tersebut menyebabkan terjadinya banjir disekitar hilir dan rentan terjadi sedimentasi. Sedimen yang terbentuk biasanya berupa endapan pasir halus, endapan organic, lumpur.

2) Aliran Air di Saluran Terbuka

Saluran terbuka merupakan saluran yang mengalirkan air pada suatu permukaan bebas. Sepanjang saluran tekanan di permukaan air adalah

tekanan atmosfer. Permukaan bebas pada aliran ini dipengaruhi oleh kecepatan, gradien, kekentalan dan geometri saluran. Menurut Triatmojo (1996) dalam Sanjaya (2017) Saluran terbuka adalah saluran air mengalir dengan muka air bebas.

Aliran saluran terbuka dapat digolongkan menjadi berbagai jenis dan diuraikan dengan berbagai cara. Penggolongan berikut dibuat berdasarkan perubahan kedalaman aliran sesuai dengan ruang dan waktu.

a. Aliran tunak (*steady flow*)

Dikatakan tunak (*steady*) bila kedalaman aliran tidak berubah atau dapat dianggap konstan selama suatu selang waktu tertentu. Sebagian besar persoalan tentang saluran terbuka umumnya hanya memerlukan penelitian mengenai perilaku aliran dalam keadaan tunak.

Dalam sebagian besar persoalan aliran tunak, berdasarkan suatu pertimbangan, maka debit dianggap tetap disepanjang bagian saluran yang lurus, dengan kata lain aliran bersifat kontinu. Oleh karena itu berdasarkan persamaan berikut (Chow, V. T. Tahun 1992) :

$$Q = V \cdot A = \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan :

Q = Debit aliran (m^3/det)

A = Luas penampang (m^2)

V = Kecepatan aliran (m/det)

Ini merupakan persamaan kontinuitas untuk aliran tunak kontinu (*continuous steady flow*).

a) Aliran seragam

Dikatakan seragam bila kedalaman sama pada setiap penampang saluran. Suatu aliran seragam dapat bersifat tunak atau tidak tunak, tergantung apakah kedalamannya berubah sesuai dengan perubahan waktu.

b) Aliran berubah

Dikatakan berubah (*Varied*), bila kedalaman aliran berubah di sepanjang saluran.

- Aliran berubah lambat laun, dikatakan berubah lambat laun bila kedalamannya berubah pada jarak yang cukup jauh atau panjang.
- Aliran berubah tiba-tiba, Aliran dikatakan berubah tiba-tiba bila kedalamannya mendadak berubah pada jarak yang cukup pendek.

b. Aliran tak tunak (*Unsteady Flow*)

Dikatakan taktunak (*Unsteady*) bila kedalamannya berubah sesuai dengan waktu. Persoalan aliran taktunak yang sering dijumpai pada saluran terbuka adalah yang berkaitan dengan gelombang translator yang merupakan suatu gelombang gravitasi yang merambat pada saluran terbuka dan menyebabkan gerak butir-butir air sejajar dengan arah aliran, sepanjang jarak tertentu.

a) Aliran seragam taktunak (jarang)

Penetapan bahwa suatu aliran bersifat seragam taktunak (*Unsteady Uniform Flow*) harus dengan syarat bahwa permukaan air berfluktuasi sepanjang waktu dan tetap sejajar dengan dasar saluran

b) Aliran taktunak (yaitu aliran berubah taktunak)

- Aliran taktunak berubah lambat laun
- Aliran taktunak berubah tiba-tiba

Pada aliran taktunak berubah lambat laun menggambarkan profil gelombang yang besarnya menengah, perubahan kedalaman berlangsung secara perlahan-lahan. Contoh umumnya adalah gelombang air pasang dan gelombang yang timbul akibat bekerjanya struktur control, misalnya pada pintu air gesek-tegak pada bangunan pintu air.

Sedangkan pada aliran taktunak berubah tiba-tiba menggambarkan profil gelombang yang sangat besar, dan juga permukaan profilnya benar-benar diskontinu. Contohnya adalah kenaikan tekanan mendadak dalam berbagai bentuk yang disebabkan oleh bekerjanya struktur control secara tepat.

3) Perilaku Aliran

Keadaan atau perilaku aliran saluran terbuka pada dasarnya ditentukan oleh pengaruh kekentalan dan gravitasi sehubungan dengan gaya-gaya inersia aliran. Tegangan permukaan air dalam keadaan tertentu dapat

pula mempengaruhi perilaku aliran, tetapi pengaruh ini tidak terlalu besar dalam masalah saluran terbuka pada umumnya yang ditemui dalam dunia perekyasaan.

Pengaruh kekentalan (viscosity) aliran dapat bersifat laminar, turbulen atau transisi, tergantung pada pengaruh kekentalan sehubungan dengan kelembamannya. Aliran adalah laminar bila gaya kekentalan relatif sangat besar dibandingkan dengan gaya inersia sehingga kekentalan berpengaruh besar terhadap perilaku aliran. Aliran adalah turbulen bila gaya kekentalan relatif lemah dibandingkan dengan gaya kelembamannya.

Tipe aliran dapat dibedakan menggunakan bilangan Froude. Bilangan froude membedakan jenis aliran menjadi tiga yakni : aliran kritis, subkritis dan superkritis (Queensland Department of Natural Resources and Mines, 2004). Ketiga jenis aliran dapat dijelaskan sebagai berikut :

- 1) Aliran kritis, jika bilangan froude sama dengan 1 ($Fr = 1$) dan gangguan permukaan (contoh: riak yang terjadi jika sebuah batu di lempar ke dalam sungai) tidak akan bergerak / menyebar melawan arah arus.
- 2) Aliran subkritis, jika bilangan froude lebih kecil dari 1 ($Fr < 1$). Untuk aliran subkritis, kedalaman biasanya lebih besar dan kecepatan aliran rendah (semua riak yang timbul dapat bergerak melawan arus). Kecepatan air < kecepatan gelombang hulu aliran dipengaruhi pengendali hilir.

3) Aliran superkritis, jika bilangan froude lebih besar dari 1 ($Fr > 1$).

Untuk aliran superkritis kedalaman relatif lebih kecil dan kecepatan relatif tinggi (segala riak yang ditimbulkan dari suatu gangguan mengikuti arah arus. Kecepatan air > kecepatan gelombang hulu aliran tidak dipengaruhi pengendali hilir.

Bilangan froude adalah bilangan tak bersatuan yang digunakan untuk mengukur resistensi dari sebuah benda yang bergerak melalui air dan membandingkan benda-benda dengan ukuran yang berbeda.

Pengaruh gravitasi terhadap aliran dapat dinyatakan dengan angka Froude. Untuk menghitung angka Froude pada awal loncat air dan di bagian hilir setelah loncatan air digunakan persamaan sebagai berikut (Chow, V.T tahun 1992) :

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} \dots \dots \dots (2)$$

Keterangan :

Fr = Bilangan Froude

v = Kecepatan aliran (m/det)

g = Gravitasi (cm/det²)

h = ketinggian (m)

Nilai V diperoleh dengan rumus :

$$v = \frac{Q}{A} \dots \dots \dots (3)$$

Keterangan :

Q = Debit aliran (m^3/dtk)

A = Luas saluran (m^2)

Nilai A diperoleh dengan rumus :

$$A = b \cdot h \dots\dots\dots (4)$$

Keterangan :

b = Lebar saluran (m)

h = Tinggi aliran (m)

B. Gerusan

1. Pengertian gerusan

Gerusan merupakan penurunan dasar sungai akibat terkikis oleh aliran air dan memiliki kecenderungan untuk merusak pondasi jembatan (Melville dan Coleman, 2000 dalam Shaskia, 2019). Menurut (Laursen, 1952 dalam Sarwono, 2016) mendefinisikan gerusan sebagai pembesaran dari suatu aliran yang disertai pemindahan material melalui aksi gerakan fluida.

Sifat alami gerusan mempunyai fenomena (Laursen dalam Sanjaya, 2017) sebagai berikut:

- a. Besar gerusan akan sama selisihnya antara jumlah material yang diangkut keluar daerah gerusan dengan jumlah material yang diangkut masuk ke dalam daerah gerusan

- b. Besar gerusan akan berkurang apabila penampang basah di daerah gerusan bertambah. Pada kondisi aliran bergerak terdapat keadaan gerusan yaitu gerusan batas, besarnya asimtotik terhadap waktu.

Penambahan gerusan akan terjadi di mana terjadi perubahan setempat dari geometri sungai seperti karakteristik tanah dasar setempat dan adanya halangan pada alir sungai berupa bangunan sungai seperti pilar dan abutmen jembatan, krib sungai, pintu air dan sebagainya. Adanya bangunan yang menghalangi laju aliran dapat menyebabkan perubahan karakteristik aliran seperti pola aliran berubah menjadi aliran spiral atau turbulensi, kecepatan aliran berubah yang menyebabkan terjadinya gerusan di sekitar bangunan.

Dalam ilmu teknik sungai yang penting adalah pengaruh pengaliran yang dapat berakibat buruk karena dibangunnya suatu bangunan silangan pada sungai berupa penempatan beberapa pilar dan cara menanggulangnya. Akibat buruk tersebut terutama terjadinya penggusuran (scouring) di sekeliling pilar. Oleh karena itu bahaya penggusuran bagi terancamnya tiang harus diperhatikan.

2. Tipe gerusan

Menurut *Ettema dan Raudkivi (1982) dalam Sukri (2018)*, perbedaan gerusan dapat dibagi menjadi:

- 1) Gerusan umum (general scour). Gerusan yang terjadi akibat dari proses alam dan tidak berkaitan sama sekali dengan ada tidaknya bangunan sungai.
- 2) Gerusan di lokalisir (constriction scour). Gerusan yang diakibatkan penyempitan alur sungai sehingga aliran menjadi terpusat.
- 3) Gerusan lokal (local scour). Merupakan akibat langsung dari struktur pada alur sungai.

Ada dua macam gerusan lokal menurut Wiyono A dkk (2006), yaitu

a. Clear water scour

Pergerakan sedimen hanya terjadi pada sekitar pilar. Ada dua macam :

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

Gerusan lokal tidak terjadi dan proses transportasi sedimen tidak terjadi.

- Untuk $0,5 \leq \left(\frac{v}{v_{cr}}\right) \leq 1,0$

Gerusan lokal terjadi menerus dan proses transportasi sedimen tidak terjadi.

b. Live bed scour

Terjadi karena adanya perpindahan sedimen. Yaitu : jika

$$\left(\frac{v}{v_{cr}}\right) > 1,0$$

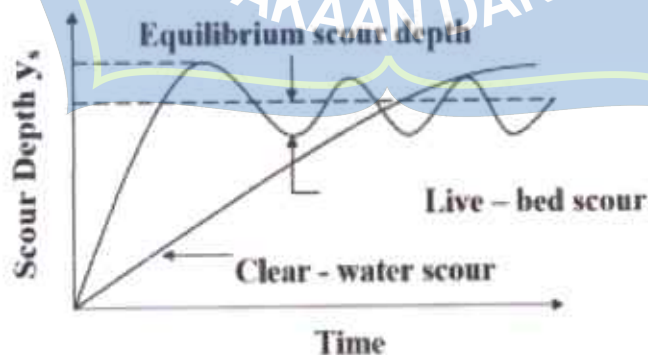
Keterangan :

V = kecepatan aliran rata-rata (m/detik)

V_0 = kecepatan aliran awal (m/detik)

Ketiga tipe gerusan tersebut dapat terjadi secara bersamaan. Gerusan dari jenis (b) dan (c) dapat dikelompokkan menjadi gerusan dengan air bersih (clear water scour) dan gerusan dengan air bersedimen (live bed scour). Gerusan dengan air bersih berkaitan dengan dasar sungai di sebelah hulu bangunan dalam keadaan diam (tidak ada material yang terangkut). Sedangkan gerusan dengan air bersedimen terjadi ketika kondisi aliran dalam saluran menyebabkan material dasar bergerak.

Hal tersebut menunjukkan bahwa tegangan geser pada saluran lebih besar dari nilai kritiknya. Keseimbangan kedalaman gerusan dicapai pada daerah transisi antara live bed scour dan clear water scour.



Gambar 1. Hubungan Kedalaman Gerusan (Y_s) Dengan Waktu
(Sumber: Breuser Dan Raudkivi, 1991 : 62 Dalam Faris, 2017)

Pada Grafik diatas menunjukkan bahwa kedalaman gerusan untuk clear water dan live bed scour merupakan fungsi dari kecepatan geser.

Kesetimbangan gerusan yang terjadi dipengaruhi oleh keadaan yang ditinjau yaitu gerusan dengan air tanpa sedimen (clear water scour) atau gerusan dengan air dengan sedimen (live bed scour). Pada keadaan clear water scour, gerakan dasar sungai dianggap hanya terjadi pada sekitar pilar dan cenderung terjadi pada dasar yang kasar.

3. Gerusan lokal pada sungai

Gerusan Lokal pada Sungai Menurut Maryono (2007) dalam Sanjaya (2017) disebutkan bahwa sungai memiliki aliran yang kompleks untuk diprediksi, tetapi dengan pengamatan dan penelitian jangka waktu yang panjang, sungai dapat diartikan sebagai sistem yang teratur yaitu bahwa semua jenis komponen penyusun sungai adalah sistem yang teratur atau dapat diprediksi. Sistem sungai merupakan system yang teratur dan kompleks yang saling memengaruhi satu sama lain terhadap setiap komponennya.

Gerusan lokal pada pilar diartikan sebagai penurunan secara tiba-tiba ketinggian dasar sungai yang disebabkan oleh aliran air terhalangi pilar (Richardson dkk, 1990 dalam Warliawati dkk, 2017).

Proses penggerusan yang terjadi dapat diakibatkan karena kondisi morfologi sungai dan adanya bangunan sungai seperti pilar jembatan yang menghalangi aliran. Bangunan-bangunan ini dipandang dapat merubah geometri alur serta pola aliran, yang selanjutnya diikuti dengan timbulnya gerusan lokal di sekitar bangunan (Legono, 1990 dalam Yunar, 2006).

Morfologi sungai merupakan salah satu faktor yang menentukan dalam proses terjadinya gerusan, hal ini disebabkan aliran saluran terbuka mempunyai permukaan bebas (free surface). Kondisi aliran saluran terbuka berdasarkan pada kedudukan permukaan bebasnya cenderung berubah sesuai waktu dan ruang, disamping itu ada hubungan ketergantungan antara kedalaman aliran, debit air, kemiringan dasar saluran dan permukaan saluran bebas itu sendiri.

Laursen dan toch dalam (1956) dalam Suma (2018) mengembangkan persamaan gerusan yang terjadi pada pilar jembatan sebagai fungsi lebar pilar dan kedalaman aliran. Persamaannya sebagai berikut :

$$d_s = 1.35 b^{0.7} y^{0.3} \dots\dots\dots (5)$$

Keterangan :

d_s = kedalaman gerusan (m)

b = lebar pilar (m)

y = kedalaman aliran (m)

Gerusan Lokal dengan Metode Colorado State University (CSU)

Persamaan yang digunakan dalam metode ini adalah sebagai berikut :

$$d_s = 2,0 y K_1 K_2 K_3 \left(\frac{b}{y} \right)^{0,65} Fr^{0,43} \dots\dots\dots (6)$$

Keterangan :

ds = Kedalaman gerusan (m)

Fr = Bilangan Froude

b = lebar pilar (m)

y = kedalaman aliran (m)

K_1 = Koefisien bentuk pilar

K_2 = Koefisien sudut aliran

K_3 = Koefisien kondisi dasar saluran

Tabel 1 Koefisien koreksi terhadap bentuk pilar (K_1)

Bentuk Pilar	K_1
Rectangular	1,22
Lenticular (pilar kapsul)	0,8
Persegi	1,1
Bulat	1
Kumpulan Silinder	1

Tabel 2 Koefisien koreksi terhadap sudut aliran (K_2)

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

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

Kedalaman gerusan lokal pada pilar dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti kecepatan aliran, kedalaman aliran, lebar pilar, debit, panjang pilar jika miring dari arus, ukuran dan gradasi dari material dasar sungai, sudut dari arus yang datang, bentuk pilar dan konfigurasi dasar sungai (Warliawati dkk, 2017).

Jika gerusan lokal di sekitar pilar terjadi dalam jangka waktu yang panjang, maka kedalaman gerusan di sekitar pilar semakin dalam, sehingga dapat mengakibatkan rusak atau robohnya konstruksi jembatan (Purnomo dkk. 2017 dalam Setiati dkk, 2019).

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 2. Mekanisme Gerusan Akibat Pola Aliran Di Sekitar Pilar (Imam S, 2014)

C. Pilar jembatan

A. Pengertian pilar jembatan

Beberapa jembatan telah mengalami kerusakan akibat adanya gerusan lokal pada struktur bawah jembatan, penyebab utamanya adalah gerusan di sekitar pilar dan abutmen jembatan (Setyandito O dkk, 2019). Pilar Jembatan adalah suatu konstruksi beton bertulang yang menumpu di atas pondasi tiang-tiang pancang dan terletak di tengah sungai atau yang lain yang berfungsi sebagai pemikul antara bentang tepi dan bentang tengah bangunan atas jembatan (Putra, 2018). Pilar-pilar dapat berupa susunan rangka pendukung (trestle), yaitu topi beton bertulang yang bertindak sebagai balok melintang (cross beam) dengan kepala tiang tertanam pada topi atau susunan kolom yang menggunakan sistem beton kopel (pile cap) yang terpisah, sistem kolom dan balok melintang terpisah.

Pilar jembatan berfungsi untuk menahan atau memikul beban yang bekerja pada jembatan. Mengingat bahwa letak pilar berada pada aliran air sungai, maka dasar sungai di sekitar pilar memiliki potensi mengalami gerusan lokal. Umumnya pilar jembatan dipengaruhi oleh aliran (arus) sungai, sehingga dalam perencanaan perlu diperhatikan dari segi kekuatan dan keamanan dari bahan-bahan hanyutan dan aliran sungai itu sendiri, maka bentuk dan penempatan pilar tidak boleh menghalangi aliran air terutama pada saat banjir.

Hal-hal yang menjadi pertimbangan dalam menggunakan pilar pada suatu konstruksi jembatan (Sanjaya, 2017) antara lain ditinjau dari:

1. Bentang jembatan yang akan direncanakan
2. Kedalaman sungai atau perilaku sungai
3. Elemen struktur yang akan digunakan

Pilar jembatan memiliki berbagai macam bentuk seperti ellips, lenticular, maupun bulat yang dapat memberi pengaruh terhadap pola aliran dan karakteristik aliran. Pola gerusan yang terjadi akan menjadi sangat kompleks dan sukar untuk ditaksir perilaku hidrodinamikanya, terutama pola aliran di hulu dan hilir pilar.

B. Bentuk dan ukuran pilar jembatan

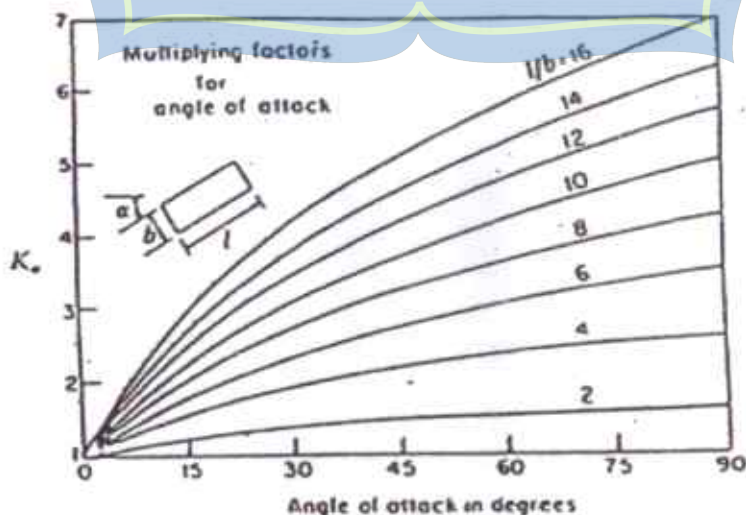
Bentuk pilar akan berpengaruh pada kedalaman gerusan lokal, pilar jembatan yang tidak bulat akan memberikan sudut yang lebih tajam terhadap aliran datang yang diharapkan dapat mengurangi gaya pusaran tapal kuda sehingga dapat mengurangi besarnya kedalaman gerusan.

Bentuk dan ukuran pilar mempengaruhi waktu yang diperlukan bagi gerusan lokal pada kondisi clear-water sampai kedalaman terakhir, tidak dengan jarak relatif (y_s/b), jika pengaruh dari kedalaman relatif (y_0/b) dan butiran relatif (b/d_{50}) pada kedalaman gerusan ditiadakan, maka nilai aktual dari (y_s/b) juga tergantung pada peningkatan dari bed material.

C. Posisi Pilar

Kedalaman gerusan lokal juga dipengaruhi atau tergantung pada 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. Koefisien sudut datang aliran karena posisi pilar digunakan pada beberapa bentuk tertentu. Hanya bentuk silinder yang tidak menggunakan koefisien sudut datang (Laursen dan toch (1956) dalam Wibowo, 2017).

Menurut, Dietz (1972) dan Neil (1973) dalam Wibowo (2017) terhadap pengaruh bentuk pilar tampak horisontal cross section, mereka menegaskan dan merekomendasikan nilai faktor bentuk pilar (K_s). Laursen dan Touch (1956), mempelajari ini pada pilar rectangular horizontal cross section dengan memberikan sudut kemiringan terhadap aliran. Bila sudut terjang aliran terhadap pilar 0° maka $K_\alpha = 1,3-1,8$.



Gambar 3. Koefisien Arah Sudut Aliran (K_α) Pada Pilar
(Sumber : Breuser Dan Raudkivi, 1991 Dalam Wibowo, 2017)

D. Matriks Penelitian Terdahulu

Matriks penelitian terdahulu merupakan ringkasan tentang penelitian yang sebelumnya pernah dilakukan di seputar masalah yang akan diteliti, sehingga penelitian-penelitian sebelumnya dapat dijadikan referensi dan perbandingan untuk penelitian yang akan dilakukan. Berdasarkan deskripsi tersebut, maka matriks penelitian terdahulu pada penelitian ini adalah pada tabel 1 sebagai berikut :



Tabel 4. Matriks Penelitian Terdahulu

No.	Nama Penulis, Tahun & Judul Penelitian	Variabel Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
1.	Sri Warliawati ; Andi Rusdin ; dan Saparuddin. 2017 Gerusan Di Sekitar Pilar Jembatan Palu I Sungai Palu	Variabel bebas : -Dimensi flume Variabel terikat : -Debit aliran -Kecepatan aliran	Penelitian ini dilakukan dengan simulasi steady flow menggunakan program aplikasi HEC RAS. Penyusunan geometrik model melalui HEC-RAS menggunakan menu file <i>Geometri Data</i> .	Berdasarkan hasil simulasi dan hitungan bridge scour HEC-RAS pada debit bulan Januari (terendah) $Q = 63.977 \text{ m}^3/\text{detik}$. Kedalaman gerusan maksimal sebesar 1.30 m dan pada debit bulan Mei (tertinggi) $Q = 204.004 \text{ m}^3/\text{detik}$ kedalaman gerusan maksimal sebesar 1.67 m .
2.	Sarwono 2016 Studi karakteristik gerusan lokal pada beberapa tipe pilar jembatan	Variabel bebas : -Dimensi pilar -Karakteristik aliran Variabel terikat : -Debit aliran -Kedalaman aliran	Penelitian ini dilakukan dengan survey lapangan, pengujian model fisik 2 dimensi dengan skala 1:20	Hasil studi menunjukkan, untuk setiap bentuk pilar mempunyai karakter yang berbeda, gerusan terdalam pada titik samping pilar, pada awal menit pertama sampai menit ke 20 gerusan mendadak dalam dan bentuk dasar sungai di sekitar pilar naik turun tidak teratur. Pada menit ke 20 sampai akhir pengaliran, penurunan gerusan hampir linier dan garis gerusan merata.
3.	Sucipto 2011 Pengaruh Kecepatan Aliran Terhadap Gerusan Lokal Pada Pilar Jembatan Dengan Perlindungan Groundsill	Variabel bebas : -Kecepatan aliran -Kedalaman aliran Variabel terikat : -Kedalaman gerusan	Penelitian dilakukan di Laboratorium Hidraulika Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang. Urutan	Dari hasil penelitian diperoleh bahwa kedalaman gerusan maksimum pada pilar silinder untuk model running (M1) terjadi pada kecepatan 0.267 m/s yaitu sebesar 42 mm sedangkan kedalaman gerusan minimum terjadi pada kecepatan 0.157

			penelitian dibagi menjadi dua bagian utama yaitu penelitian secara fisik dan penelitian secara hipotetik dan analitik.	m/s yaitu sebesar 3 mm.
4.	Nina Shaskia ; Maimun Rizalihadi. 2019 Pola gerusan lokal akibat perlakuan pada abutmen jembatan	Variabel bebas : -Dimensi flume Variabel terikat : -Pola gerusan -Debit aliran -Kedalaman gerusan	Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Hidrolika Model Teknik Sungai dan Pantai, Fakultas Teknik Universitas Syiah Kuala	Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan pada abutmen berpengaruh terhadap kedalaman gerusan yang terjadi. akibat dibelokkan 90° kedalaman gerusan pada titik 1, 3, dan 4 berturut-turut berkurang sebanyak 17,8%, 20,5%, dan 24,3% dibanding dengan gerusan pada abutmen tanpa perlakuan.
5.	Muayyad Feisal Suma ; Fuad Halim ; dan Liany A. Hendratta 2018 Analisis Gerusan Lokal Pada Pilar Jembatan Kuwil Kabupaten Minahasa Utara Menggunakan Metode Empiris	Variabel bebas : -Metode empiris -Dimensi pilar -Kedalaman gerusan Variabel terikat : -Debit aliran -Kecepatan aliran -Kedalaman gerusan	Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah : 1. Survei lapangan. Di Kecamatan Kalawat, Kabupaten Minahasa Utara 2. Pengumpulan data Data primer dan sekunder	Berdasarkan hasil analisa fisik dan analisa menggunakan metode empiris yang memiliki kedalaman gerusan : metode Lajunen 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.
6.	Faris Triyadhi; Puji Harsanto; Jazaul Ikhsan. 2017 Analisis Numerik Pengaruh	Variabel bebas : -Dimensi pintu flume. Variabel terikat :	Penelitian ini dilakukan di laboratorium dengan simulasi model numerik dengan lebar saluran 0,46	Hasil penelitian menunjukkan gerusan maksimum terjadi pada sisi samping pilar kapsul dengan kedalaman gerusan 2,5 cm sedangkan kedalaman gerusan pada sisi

	Aliran Debris Terhadap Gerusan Lokal Pada Pilar Menggunakan Software iRIC : Nays 2DH 1.0	-Debit aliran -Kecepatan aliran	m, dan panjang saluran 5 m dengan kondisi saluran superkritik dan aliran seragam.	samping pilar tajam sebesar 2,4 cm.
7.	Teuku Devansyah Putra ; Eldina Fatimah ; dan Azmeri. 2018 Pengaruh Pilar Jembatan Pango Terhadap Pola Aliran Sungai Krueng Aceh	Variabel bebas : -Dimensi flume. Variabel terikat : -Debit aliran -Kecepatan aliran	Penelitian ini menggunakan program Surfacewater Modeling System (SMS, Versi 11.2). Panjang sungai yang ditinjau ± 500 meter. Debit aliran yang digunakan pada penelitian ini menggunakan debit banjir periode ulang Q-100 tahunan yaitu 627,74 m³/detik (yang melewati jembatan fly over Pango).	Dari hasil simulasi pola aliran didapatkan besaran kecepatan aliran tanpa pilar pada lokasi tengah aliran pada titik tinjauan V3 dengan jarak 45 m dari tanggul sungai kecepatan maksimumnya 0,45 m/det dan besaran kecepatan aliran dengan adanya pilar jembatan pada lokasi tengah pilar pada titik tinjauan V3 dengan jarak 33 m dari tanggul sungai kecepatan maksimumnya 0,35 m/det.
8.	Oki Setyandito ; Andrew John Pierre ; Juliastuti ; Adelia D Nataatmadja ; Alexander Michael 2019 Pemodelan Potensi Gerusan Dasar pada Struktur Bawah Jembatan	Variabel bebas : -Dimensi flume Variabel terikat : -Debit aliran -Kecepatan aliran	Metodologi yang digunakan dalam melakukan penelitian adalah dengan uji model fisik 2D dan numeris karakteristik aliran dasar aliran terhadap pola gerusan yang terjadi disekitar variasi model struktur bawah / abutment jembatan.	Hasil penelitian menunjukkan gerusan maksimum terjadi pada sisi samping bagian depan abutment daerah hulu. Perkembangan gerusan minimum terjadi pada bagian belakang abutment daerah hulu maupun hilir. Kecepatan aliran berpengaruh terhadap kedalaman gerusan. Pola gerusan yang terjadi di semua abutment dengan berbagai kecepatan aliran relatif sama menghasilkan lebar dan kedalaman gerusan yang berbeda.

9.	N. Retno Setiati ; Ireng Guntoroji ; dan Elis Kurniawati. 2019 Analisis Penanganan Dampak Bahaya Gerusan Aliran Sungai Pada Struktur Pilar Jembatan (Analysis Of The River Flow Scouring Hazard Countermeasures On Bridge Pier Structures)	Variabel bebas : -Dimensi flume -Gerusan Variabel terikat : -Debit aliran -Kecepatan aliran	Analisis gerusan dilakukan dengan menggunakan program HEC-RAS (Hydrology Engineering Center's River Analysis System).	Analisis hasil menunjukkan bahwa koefisien buangan Cd di saluran horizontal lebih dari besar nilainya di saluran miring dengan arah aliran dan perubahan ruang antar gerbang tidak menyebabkan perbedaan penting antara nilai koefisien buangan Cd
10.	Ahmad Syarif Sukri; Muriadin; dan Isra Rosliana. 2018 Uji Laboratorium Kedalaman Gerusan Pada Pilar Perancah Jembatan Pasar Baru	Variabel bebas : -Dimensi flume -Kedalaman gerusan Variabel terikat : -Debit aliran -Kecepatan aliran	Penelitian ini menggunakan alat advance hidrology system di Laboratorium Keairan, Fakultas Teknik Universitas Hulu Oleo.	Hasil penelitian tentang Uji Laboratorium Kedalaman Gerusan pada pilar perancah jembatan Pasar Baru menunjukkan bahwa kedalaman gerusan maximum terjadi pada pilar jalur perancah empat dan lima samping samping kiri dan samping kanan pilar 4,5,6, dan 7 yang mencapai kedalaman maximal 0,8 cm.

BAB III

METODE PENELITIAN

A. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini berlokasi di jembatan Patte'ne Sungai Pappa' Kelurahan Maradekaya Kecamatan Pattalassang Kabupaten Takalar Provinsi Sulawesi Selatan sebelah utara dari Kota Makassar. Secara geografis terletak di 5°25'41" LS dan 119°27'38" BT, ± 31 KM dari Kota Takalar. Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Februari 2021 - Maret 2021.



Gambar 4. Peta Lokasi Penelitian

B. Jenis Penelitian dan Sumber Data

1. Jenis Penelitian

Penelitian dilakukan dengan cara melakukan studi lapangan secara langsung dengan pemilihan lokasi yang cukup representatif, sehingga terpenuhi maksud dan tujuan studi kasus lapangan dan dapat mengamati fenomena dan kondisi alam apa adanya.

Pada penelitian lapangan, justru kondisi riil/nyata yang betul-betul akan ditampilkan, sehingga dapat memperlihatkan berbagai perbedaan dengan hasil penelitian terdahulu.

2. Sumber Data

Pada penelitian ini akan menggunakan dua sumber data, yaitu :

- a. Data primer adalah data yang diperoleh langsung dari uji simulasi fisik di lapangan.
- b. Data sekunder adalah data yang diperoleh dari berbagai literatur dan hasil penelitian yang sudah ada, baik yang telah dilakukan di lapangan maupun dilakukan di tempat yang berkaitan dengan penelitian pengaruh kecepatan aliran terhadap gerusan lokal di sekitar pilar jembatan.

C. Rancangan Model Penelitian

Berikut adalah hal-hal yang berkaitan dengan rancangan model penelitian yang akan dilakukan :

1. Alat Penelitian

Alat yang digunakan adalah sebagai berikut :

a. Current meter (Flow Watch)

Current Meter (Flow Watch) adalah suatu alat yang digunakan untuk mengukur kecepatan aliran air. Alat ini digunakan dalam dunia pendidikan dan dalam dunia teknik sipil. Alat yang penting dalam perencanaan struktur bangunan air.



Gambar 5. Flow Watch

b. Bola

Bola digunakan saat melakukan pengukuran kecepatan aliran (secara manual).



Gambar 6. Bola

c. Stopwatch

Stopwatch atau disebut juga dengan pengukur waktu merupakan alat yang digunakan untuk mengukur atau menghitung waktu. Bentuk dari alat ini menyerupai dengan arloji namun tidak difungsikan sebagai jam.



Gambar 7. Stopwatch

d. Meteran

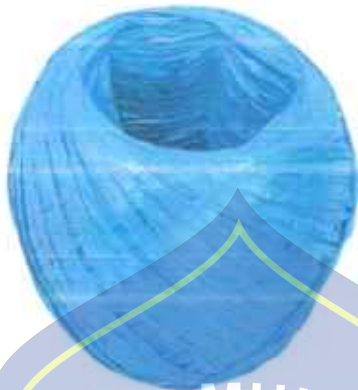
Meteran atau disebut pita ukur karena umumnya bendanya berbentuk pita dengan panjang tertentu. Fungsi utama dari meteran adalah untuk mengukur jarak atau panjang.



Gambar 8. Meteran

e. Tali

Digunakan sebagai penanda di setiap titik yang ditinjau



Gambar 9. Tali

f. Kamera

Alat yang digunakan untuk mendokumentasikan setiap percobaan.



Gambar 10. Kamera

g. Rambu ukur/ bambu

Digunakan untuk mengukur kedalaman dasar saluran (sungai).

h. Alat tulis

Digunakan untuk mencatat semua data hasil percobaan saat melakukan penelitian di lapangan.

i. Tabel Pengamatan

Tabel pengamatan digunakan untuk hasil data yang diperoleh dari setiap percobaan yang dilaksanakan.

D. Variabel Penelitian

Adapun variabel yang digunakan dalam penelitian adalah :

1. Variabel bebas, merupakan variabel yang mempengaruhi variabel lain diantaranya adalah :
 - a. Lebar Dasar Saluran (B)
 - b. Kedalaman Aliran (H)
 - c. Kecepatan Aliran (V)
2. Variable terikat, merupakan variabel yang dipengaruhi variabel lain seperti :
 - a. Debit Aliran (Q).
 - b. Kedalaman Gerusan

E. Prosedur Penelitian

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini adalah :

1. Mempersiapkan semua alat dan bahan yang akan digunakan dalam penelitian ini.
2. Melakukan pengukuran luas penampang melintang sungai secara keseluruhan dengan menggunakan meteran. lalu dibagi menjadi beberapa titik bagian yang sama dengan interval tertentu dengan menandai setiap titik menggunakan tali.
3. Setelah itu menghitung kedalaman saluran/sungai dengan menggunakan bambu atau alat ukur kedalaman yang diukur di setiap titik yang telah

ditandai menggunakan tali.

4. Mengukur kecepatan aliran pada kedalaman sungai di setiap titik yang ditinjau atau titik interval yang telah dibuat sebelumnya dengan menggunakan alat ukur kecepatan.
5. Perlu diingat pada setiap percobaan untuk didokumentasikan.

F. Analisis Data

Setelah semua data telah diperoleh, selanjutnya dilakukan analisis data sebagai berikut :

1. Menghitung luas penampang saluran (A)

Perhitungan luas penampang melintang sungai di hulu dan hilir. Luas penampang saluran dihitung berdasarkan dimensi saluran yang akan digunakan.

2. Menghitung kedalaman aliran

Menghitung kedalaman aliran pada setiap titik yang ditinjau.

3. Menghitung kecepatan aliran

Selanjutnya melakukan pengukuran kecepatan aliran menggunakan alat ukur kecepatan aliran (current meter) dan secara manual menggunakan bola pимpong untuk nantinya digunakan dalam perhitungan debit.

4. Menghitung debit aliran (Q)

Setelah luas penampang dan kecepatan aliran diketahui, maka selanjutnya dapat dilakukan perhitungan debit aliran pada tiap titik yang ditinjau.

5. Menghitung bilangan Froude

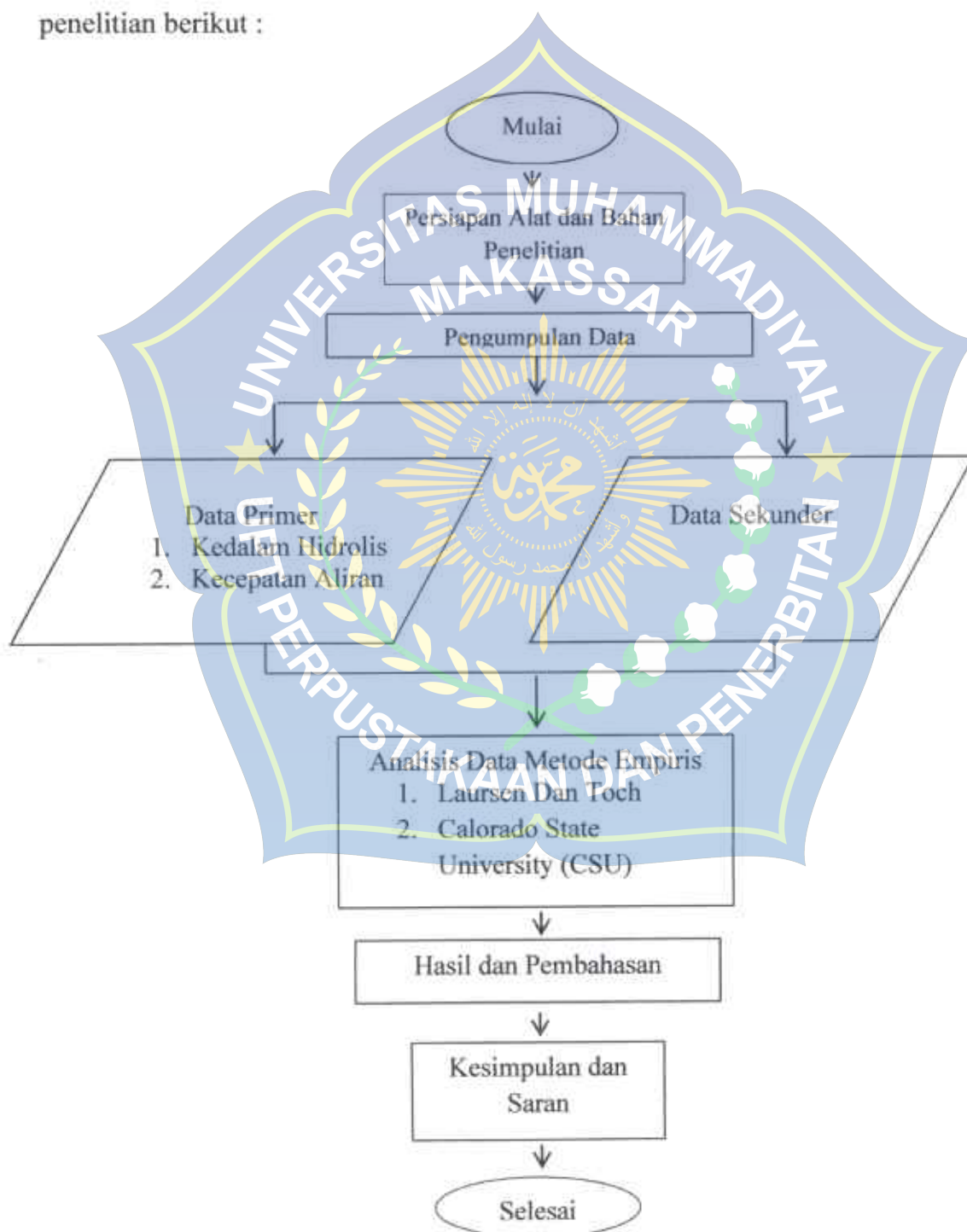
Bilangan froude berfungsi untuk mengetahui jenis aliran yang mengalir dalam saluran.

6. Penentuan jenis aliran yang terjadi

Menentukan jenis aliran mengacu pada bilangan Froude. Jika bilangan froude sama dengan 1 ($Fr = 1$) maka aliran tersebut adalah aliran kritis. Jika bilangan Froude lebih kecil dari 1 ($Fr < 1$) maka aliran tersebut adalah aliran subkritis. Dan jika bilangan froude lebih besar dari 1 ($Fr > 1$) maka jenis alirannya adalah aliran superkritis.

G. Bagan Alur Penelitian

Untuk memudahkan dalam pelaksanaan penelitian dibuat alur penelitian berikut :



Gambar 11. Bagan Alur Penelitian

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil

1. Kedalaman Hidrolis

Pengukuran Kedalaman dilakukan dengan cara membagi sungai arah memanjang menjadi 3 pias (P) dan setiap pias dibagi menjadi beberapa titik (S) dengan jarak setiap titiknya (S) 2 meter. Kemudian pada setiap titik pengamatan diukur kedalamannya. Untuk penelitian ini telah diperoleh kedalaman aliran yang merupakan rata-rata ketinggian air untuk setiap simulasi yang dilakukan.

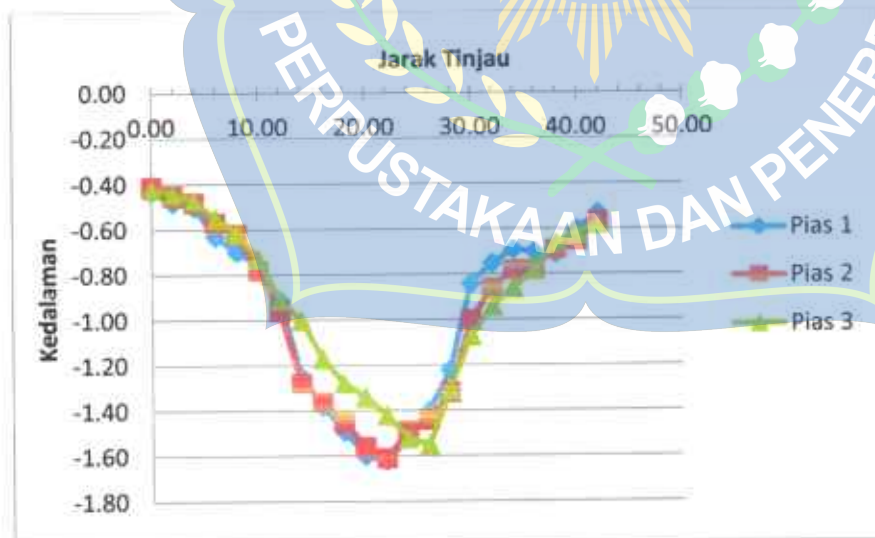
Hasil pengukuran kedalaman hidrolis di depan pilar dapat di lihat pada tabel sebagai berikut :

Tabel 5. Kedalaman jarak tinjau 5, 10 dan 15 meter di depan pilar

No.	Jarak Tinjau	Kedalaman Hidrolis		
		Pias 1	Pias 2	Pias 3
1	2	3	4	5
1	0,00	0,00	0,00	0,00
2	2,00	-0,43	-0,41	-0,42
3	4,00	-0,48	-0,45	-0,44
4	6,00	-0,50	-0,48	-0,47
5	8,00	-0,63	-0,57	-0,55
6	10,00	-0,70	-0,62	-0,61
7	12,00	-0,76	-0,78	-0,73
8	14,00	-0,91	-0,96	-0,91
9	16,00	-1,25	-1,28	-1,00

Tabel 5. Lanjutan

1	2	3	4	5
10	18,00	-1,38	-1,36	-1,17
11	20,00	-1,49	-1,45	-1,28
12	22,00	-1,60	-1,56	-1,34
13	24,00	-1,62	-1,61	-1,42
14	26,00	-1,52	-1,49	-1,52
15	28,00	-1,40	-1,44	-1,55
16	30,00	-1,22	-1,32	-1,31
17	32,00	-0,84	-1,00	-1,07
18	34,00	-0,75	-0,86	-0,94
19	36,00	-0,69	-0,78	-0,86
20	38,00	-0,70	-0,78	-0,78
21	40,00	-0,71	-0,69	-0,66
22	42,00	-0,60	-0,65	-0,62
23	44,00	-0,53	-0,57	-0,58
24	44,30	0,00	0,00	0,00
Rata-rata		-0,86	-0,88	-0,84



Gambar 12 : Grafik Perbandingan antara kedalaman aliran pada pias 1,2 & 3 di hulu pilar.

Pada Gambar 12 dapat diketahui bahwa perbedaan kedalaman aliran pada masing-masing jarak tinjau 5, 10 dan 15 meter di hulu pilar relatif sama atau kecil perbedaannya.

2. Luas Penampang

Dari tabel kedalaman hidrolis di atas dapat dihitung luas penampang pada jarak tinjau 5 meter di hulu/depan pilar di mana lebar (b) = 44,30 m, kedalaman (h) = 0,86 m dan kemiringan (m) = 0,13 m menggunakan rumus perhitungan luas penampang (A) pada persamaan (5) sebagai berikut :

$A = bh + mh^2 = 42,00 \times 0,86 + 0,13 \times 0,86^2 = 38,32 \text{ m}^2$. Perhitungan selanjutnya diselesaikan dengan cara yang sama dan hasilnya dirangkum pada tabel 6 sebagai berikut :

Tabel 6. Hasil perhitungan luas penampang pada pada jarak 5 meter depan pilar.

No	Jarak Tinjau	Kedalaman Hidrolis	Lebar Dasar	Kemiringan	Luas Penampang
1	2	3	4	5	6
1	2,00	0,00	44,30	0,00	38,32
2	4,00	0,43		0,22	
3	6,00	0,48		0,03	
4	8,00	0,50		0,01	
5	10,00	0,63		0,07	
6	12,00	0,70		0,04	
7	14,00	0,76		0,03	
8	16,00	0,91		0,08	
9	18,00	1,25		0,17	
10	20,00	1,38		0,07	
11	22,00	1,49		0,06	
12	24,00	1,60		0,06	
13	26,00	1,62		0,01	
14	28,00	1,52		0,05	
15	30,00	1,40		0,06	
16	32,00	1,22		0,09	
17	34,00	0,84		0,19	

Tabel 6. Lanjutan

1	2	3	4	5	6
18	36,00	0,75		0,05	
19	38,00	0,69		0,03	
20	40,00	0,70		0,01	
21	42,00	0,71		0,01	
22	44,00	0,60		0,06	
23	46,00	0,53		0,04	
24	46,30	0,00		1,76	
Rata-rata		0,86	44,30	0,13	38,32

Luas penampang pada jarak tinjau 10 meter di hulu/depan pilar di mana lebar (b) = 44,23 m, kedalaman (h) = 0,88 m dan kemiringan (m) = 0,15 m menggunakan rumus perhitungan luas penampang (A) pada persamaan (5) sebagai berikut :

$A = bh + mh^2 = 44,23 \times 0,88 + 0,15 \times 0,88^2 = 39,02 \text{ m}^2$ Perhitungan selanjutnya diselesaikan dengan cara yang sama dan hasilnya dirangkum pada tabel 7 sebagai berikut :

Tabel 7. Hasil perhitungan luas penampang pada pada jarak 10 meter depan pilar.

No	jarak tinjau	kedalaman hidrolis	lebar dasar	kemiringan	luas penampang
1	2	3	4	5	6
1	0,00	0,00	44,23	0,00	39,02
2	2,00	0,41		0,21	
3	4,00	0,45		0,02	
4	6,00	0,48		0,02	
5	8,00	0,57		0,05	
6	10,00	0,62		0,03	
7	12,00	0,78		0,08	
8	14,00	0,96		0,09	
9	16,00	1,28		0,02	

Tabel 7. Lanjutan

1	2	3	4	5	6
10	18,00	1,36	44,23	0,04	39,02
11	20,00	1,45		0,05	
12	22,00	1,56		0,06	
13	24,00	1,61		0,03	
14	26,00	1,49		0,06	
15	28,00	1,44		0,03	
16	30,00	1,32		0,06	
17	32,00	1,00		0,02	
18	34,00	0,86		0,07	
19	36,00	0,78		0,04	
20	38,00	0,78		0,00	
21	40,00	0,69		0,05	
22	42,00	0,65		0,02	
23	44,00	0,57		0,04	
24	44,23	0,00		2,47	
		0,88	44,23	0,15	39,02

Luas penampang pada jarak tinjau 15 meter di hulu/depan pilar di mana lebar (b) = 44,14 m, kedalaman (h) = 0,84 m dan kemiringan (n) = 0,23 m menggunakan rumus perhitungan luas penampang (A) pada persamaan (5) sebagai berikut :

$A = bh + mh^2 = 44,14 \times 0,84 + 0,23 \times 0,84^2 = 37,37 \text{ m}^2$. Perhitungan selanjutnya diselesaikan dengan cara yang sama dan hasilnya dirangkum pada tabel 8 sebagai berikut :

Tabel 8. Hasil perhitungan luas penampang pada pada jarak 15 meter depan pilar.

No	jarak tinjau	kedalaman hidrolis	lebar dasar	kemiringan	luas penampang
1	2	3	4	5	6
1	0,00	0,00	44,14	0,00	37,37
2	2,00	0,42		0,21	

Tabel 8. Lanjutan

1	2	3	4	5	6
3	4,00	0,44		0,01	
4	6,00	0,47		0,02	
5	8,00	0,55		0,04	
6	10,00	0,61		0,03	
7	12,00	0,73		0,06	
8	14,00	0,91		0,09	
9	16,00	1,00		0,05	
10	18,00	1,17		0,09	
11	20,00	1,28		0,06	
12	22,00	1,34		0,03	
13	24,00	1,42	44,14	0,04	37,37
14	26,00	1,52		0,05	
15	28,00	1,55		0,02	
16	30,00	1,31		0,12	
17	32,00	1,07		0,12	
18	34,00	0,94		0,07	
19	36,00	0,86		0,04	
20	38,00	0,78		0,04	
21	40,00	0,66		0,06	
22	42,00	0,62		0,02	
23	44,00	0,58		0,02	
24	44,14	0,00		4,14	
		0,84	44,14	0,23	37,37

3. Kecepatan aliran

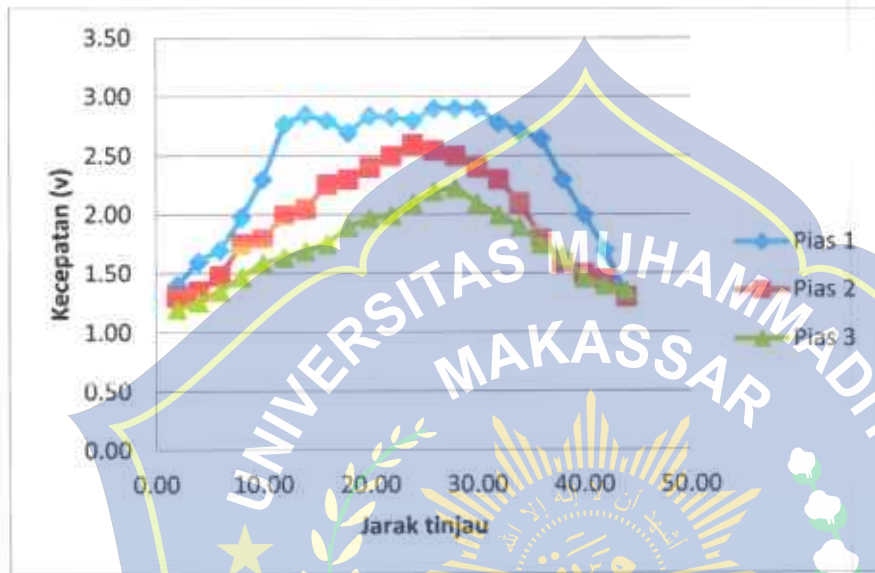
Kecepatan aliran (U_0) diukur dengan dua cara menggunakan Flow watch dan Bola (manual). *Flow watch* memberikan data kecepatan secara otomatis terhadap aliran pada saluran untuk titik pengamatan yang ditentukan.

Hasil perhitungan kecepatan aliran di hulu/depan pilar dapat dilihat pada tabel berikut :

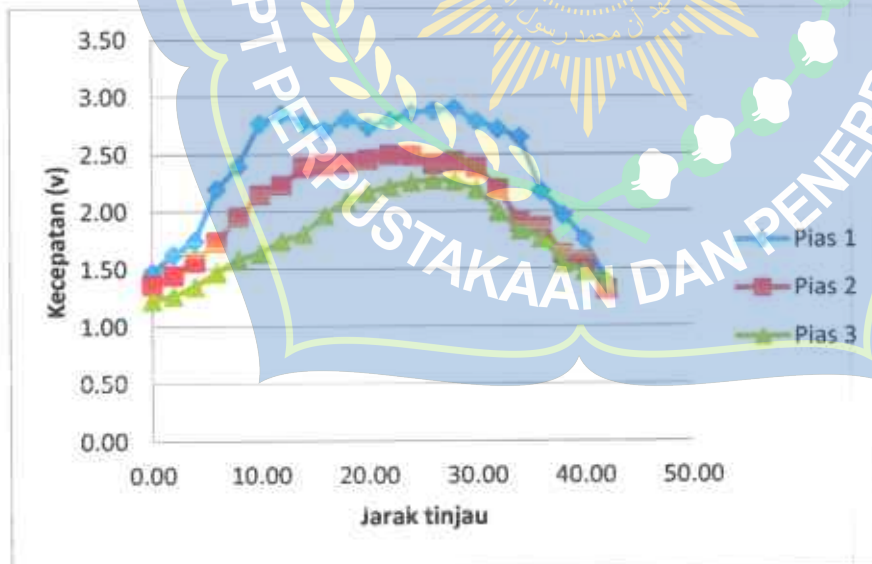
Tabel 9. Kecepatan aliran dengan jarak tinjau 5, 10 dan 15 meter hulu/depan pilar.

No.	Jarak Tinjau	Kecepatan (V)					
		Flow Watch			Bola		
		5 m	10 m	15 m	5 m	10 m	15 m
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	2,00	1,40	1,30	1,20	1,47	1,36	1,23
3	4,00	1,60	1,35	1,26	1,63	1,45	1,27
4	6,00	1,70	1,48	1,35	1,75	1,57	1,35
5	8,00	1,98	1,75	1,47	2,20	1,74	1,47
6	10,00	2,30	1,80	1,59	2,40	1,96	1,59
7	12,00	2,77	2,00	1,64	2,77	2,15	1,64
8	14,00	2,85	2,05	1,69	2,85	2,23	1,75
9	16,00	2,80	2,26	1,75	2,78	2,39	1,81
10	18,00	2,70	2,30	1,90	2,71	2,41	1,97
11	20,00	2,84	2,40	1,97	2,81	2,43	2,10
12	22,00	2,83	2,50	2,00	2,74	2,46	2,17
13	24,00	2,80	2,60	2,10	2,80	2,50	2,22
14	26,00	2,90	2,55	2,20	2,86	2,49	2,26
15	28,00	2,90	2,50	2,23	2,88	2,42	2,28
16	30,00	2,90	2,40	2,10	2,90	2,44	2,27
17	32,00	2,78	2,30	2,00	2,79	2,39	2,20
18	34,00	2,71	2,10	1,90	2,72	2,20	2,00
19	36,00	2,65	1,80	1,75	2,65	1,91	1,84
20	38,00	2,30	1,60	1,65	2,18	1,87	1,77
21	40,00	2,00	1,50	1,46	1,97	1,63	1,55
22	42,00	1,70	1,45	1,40	1,76	1,57	1,48
23	44,00	1,30	1,30	1,35	1,38	1,32	1,40
24	44,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rata-rata		0,13	0,15	0,23	2,21	1,87	1,65

Pada tabel 9, dapat dilihat perbedaan kecepatan aliran di setiap titik pada jarak tinjau 5 meter dari hulu pilar.



Gambar 13 : Grafik kecepatan aliran menggunakan flow watch



Gambar 14 : Grafik kecepatan aliran menggunakan bola

Dari grafik 13 titik pengamatan pada pias 1 dengan pengukuran menggunakan current meter dapat diketahui bahwa nilai kecepatan aliran pada pias 1 yang berjarak 5 meter dari hulu pilar mengalami perubahan

kecepatan aliran yang beragam, hal ini dipengaruhi oleh jarak titik tinjau yang cukup dekat dengan pilar. Sedangkan pada gambar 14 pada pias 2 dengan jarak 10 meter dari hulu pilar kecepatan air cukup tenang dibandingkan pias 1. Selanjutnya pada pias 3 kecepatan aliran cukup stabil, kecepatan aliran di daerah tengah sungai tinggi dipengaruhi oleh dasar sungai yang cukup dalam.

Dari grafik 14 untuk titik pengamatan pada masing-masing pias 1, 2 dan 3 dengan menggunakan bola (manual) dilihat bahwa nilai kecepatan aliran yang didapatkan relatif sama dengan pengukuran kecepatan menggunakan flow watch.

4. Debit

- Debit aliran dengan jarak tinjau 5 meter hulu/depan pilar menggunakan alat ukur flow watch dan bola (manual).

Tabel 10. Debit dengan jarak tinjau 5 meter

No.	Luas Penampang (m)	Kecepatan (v)		Debit	
		Flow Watch	Bola	Flow Watch	Bola
1	2	3	4	5	6
1	38,32	0,00	0,00	0,00	0,00
2		1,40	1,47	53,65	56,34
3		1,60	1,63	61,32	62,47
4		1,70	1,75	65,15	67,07
5		1,98	2,20	75,88	84,31
6		2,30	2,40	88,15	91,98
7		2,77	2,77	106,16	106,16

Tabel 10. Lanjutan

1	2	3	4	5	6
8		2,85	2,85	109,22	109,34
9		2,80	2,78	107,31	106,54
10		2,70	2,71	103,48	103,86
11		2,84	2,81	108,84	107,69
12		2,83	2,74	108,46	105,01
13		2,80	2,80	107,31	107,31
14		2,90	2,86	111,14	109,61
15		2,90	2,88	111,14	110,37
16	38,32	2,90	2,90	111,14	111,14
17		2,78	2,79	106,54	106,93
18		2,71	2,72	103,96	104,24
19		2,65	2,65	101,56	101,56
20		2,30	2,18	88,15	83,55
21		2,00	1,97	76,65	75,50
22		1,70	1,76	65,15	67,45
23		1,30	1,38	49,82	52,89
24		0,00	0,00	0,00	0,00
	38,32	2,20	2,21	84,17	84,64

5. Karakteristik aliran

Bilangan froude adalah perbandingan gaya inersia dengan berat suatu aliran. Dengan demikian, bilangan Froude merupakan fungsi dari semua peristiwa pola aliran yang terjadi di dalam saluran. Hal ini bahwa bilangan froude merupakan bilangan yang penting dalam menentukan kondisi aliran pada saat aliran kritis, subkritis, maupun superkritis.

Perhitungan bilangan Froude dengan jarak tinjau 5 meter sebelum pilar dengan kecepatan menggunakan alat ukur flow watch dan bola (manual).

Untuk menghitung bilangan Froude digunakan persamaan sebagai berikut.

Diketahui nilai kecepatan aliran menggunakan flow watch dan bola, di mana kecepatan (v) = 1,40 m/dt, kedalaman (h) = 0,43 m, dan gravitasi $g = 9,81 \text{ m/d}^2$ dan kecepatan (v) = 1,47 m/dt, kedalaman (h) = 0,43 m, dan gravitasi $g = 9,81 \text{ m/d}^2$ menggunakan rumus bilangan froude (Fr) pada persamaan (3) sebagai berikut :

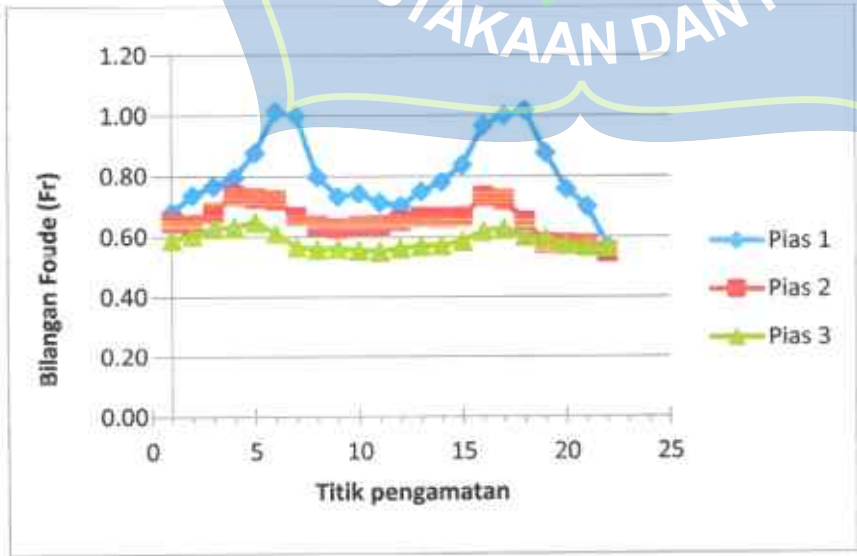
$Fr = 1,40 / \sqrt{9,81 \times 0,43} = 0,68$ (current meter) dan $Fr = 1,47 / \sqrt{9,81 \times 0,43} = 0,72$ (bola), untuk perhitungan selanjutnya diselesaikan dengan cara yang sama dan hasilnya di rangkum dalam tabel 11 sebagai berikut :

Tabel 11. Bilangan Froude 5 meter di hulu pilar

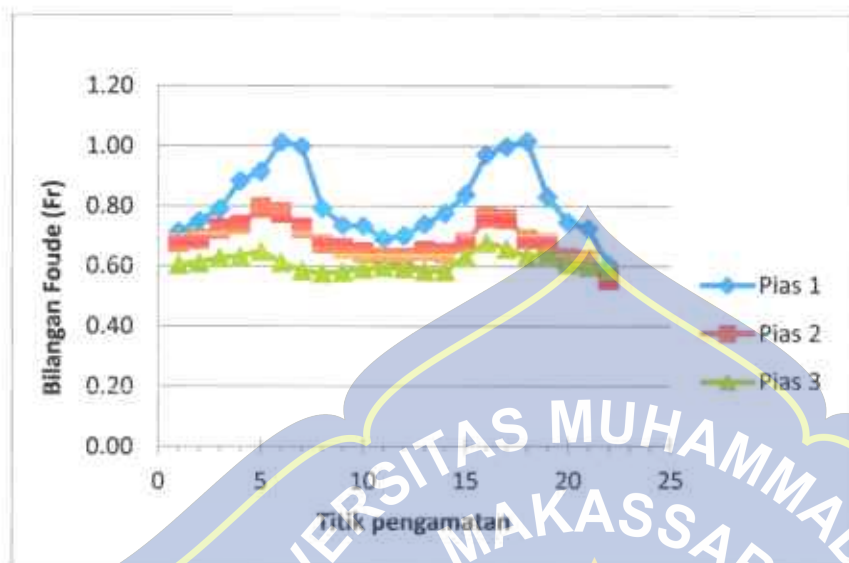
No.	Kecepatan (v)		Kedalaman (h)	Fr		Ket	
	Flow Watch	Bola		Flow Watch	Bola	Flow Watch	Bola
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-
2	1,40	1,47	0,43	0,68	0,72	Subkritis	Subkritis
3	1,60	1,63	0,48	0,74	0,75	Subkritis	Subkritis
4	1,70	1,75	0,50	0,77	0,79	Subkritis	Subkritis
5	1,98	2,20	0,63	0,80	0,88	Subkritis	Subkritis
6	2,30	2,40	0,70	0,88	0,92	Subkritis	Subkritis
7	2,77	2,77	0,76	1,01	1,01	Superkritis	Superkritis
8	2,85	2,85	0,91	1,00	1,00	Kritis	Kritis

Tabel 11. Lanjutan

1	2	3	4	5	6	7	8
9	2,80	2,78	1,25	0,80	0,79	Subkritis	Subkritis
10	2,70	2,71	1,38	0,73	0,74	Subkritis	Subkritis
11	2,84	2,81	1,49	0,74	0,73	Subkritis	Subkritis
12	2,83	2,74	1,60	0,71	0,69	Subkritis	Subkritis
13	2,80	2,80	1,62	0,70	0,70	Subkritis	Subkritis
14	2,90	2,86	1,52	0,75	0,74	Subkritis	Subkritis
15	2,90	2,88	1,40	0,78	0,78	Subkritis	Subkritis
16	2,90	2,90	1,22	0,84	0,84	Subkritis	Subkritis
17	2,78	2,79	0,84	0,97	0,97	Subkritis	Subkritis
18	2,71	2,72	0,75	1,00	1,00	Kritis	Kritis
19	2,65	2,65	0,69	1,02	1,02	Superkritis	Superkritis
20	2,30	2,18	0,70	0,88	0,83	Subkritis	Subkritis
21	2,00	1,97	0,71	0,76	0,75	Subkritis	Subkritis
22	1,70	1,76	0,60	0,70	0,73	Subkritis	Subkritis
23	1,30	1,38	0,53	0,57	0,61	Subkritis	Subkritis
24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Subkritis	Subkritis
	2,20	2,21	0,86	0,75	0,76	Subkritis	Subkritis



Gambar 15 : Grafik bilangan Froude (fr) menggunakan flow watch



Gambar 16 : Grafik bilangan Froude (Fr) menggunakan bola

Pada gambar 15 menunjukkan bahwa adanya pilar yang menghalangi arus air memberi pengaruh terhadap karakteristik (Fr) aliran di sekitarnya, aliran sungai yang sebelumnya berupa aliran normal atau subkritis menjadi aliran kritis pada titik 8 dan 18. Pada titik 7 dan 19 aliran berubah menjadi superkritis, hal ini dipengaruhi oleh pilar jembatan yang berada 5 meter tepat di depan titik pengamatan. Sedangkan pada jarak 10 dan 15 meter dari hulu pilar aliran cenderung mengalami aliran normal atau normal, ini dipengaruhi oleh jarak titik pengamatan cukup jauh dari pilar jembatan sehingga arus air tidak terhalang.

Pada gambar 16 dapat dilihat aliran yang terjadi pada setiap pias dengan jarak 5, 10 dan 15 meter dari hulu/depan pilar juga tidak jauh berbeda dengan gambar 15, letak pilar yang menghalangi arus air memberi sangat mempengaruhi aliran di sekitarnya.

6. Perhitungan Gerusan Lokal (ds) dengan Pendekatan Empiris

Perhitungan kedalaman gerusan dalam penelitian ini menggunakan 2 metode empiris yaitu metode Laursen dan Toch dan The Colorado State University (CSU).

a. Perhitungan Gerusan Lokal dengan Metode Laursen dan Toch

Diketahui di mana lebar pilar (b) = 1 m dan kedalaman (h) = 0,43 m menggunakan rumus perhitungan kedalaman gerusan (Ds) pada persamaan (6) sebagai berikut :

$$Ds = 1,35 \times 1^{0,7} \times 0,43^{0,3} = 1,05 \text{ m}$$

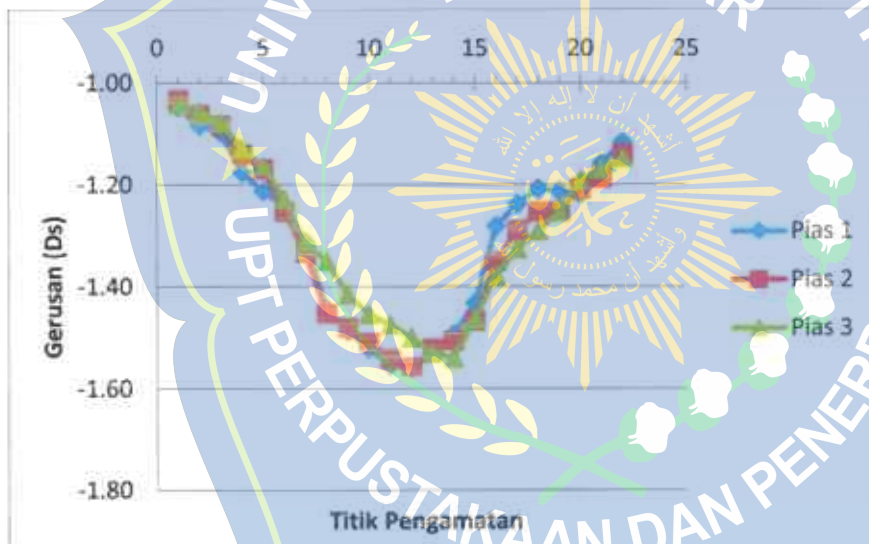
untuk perhitungan selanjutnya diselesaikan dengan cara yang sama dan hasilnya dapat dilihat pada tabel 11 berikut :

Tabel 12. Kedalaman gerusan metode Laursen dan Toch

No.	b	y			Ds		
		5 m	10 m	15 m	5 m	10 m	15 m
1	2	34	5	6	7	8	9
1	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	1	0,43	0,41	0,42	1,05	1,03	1,04
3	1	0,48	0,45	0,44	1,08	1,06	1,06
4	1	0,50	0,48	0,47	1,10	1,08	1,08
5	1	0,63	0,57	0,55	1,18	1,14	1,13
6	1	0,70	0,62	0,61	1,21	1,17	1,16
7	1	0,76	0,78	0,73	1,24	1,25	1,23
8	1	0,91	0,96	0,91	1,31	1,33	1,31
9	1	1,25	1,28	1,00	1,44	1,45	1,35
10	1	1,38	1,36	1,17	1,49	1,48	1,42
11	1	1,49	1,45	1,28	1,52	1,51	1,45
12	1	1,60	1,56	1,34	1,55	1,54	1,47
13	1	1,62	1,61	1,42	1,56	1,56	1,50
14	1	1,52	1,49	1,52	1,53	1,52	1,53
15	1	1,40	1,44	1,55	1,49	1,51	1,54
16	1	1,22	1,32	1,31	1,43	1,47	1,46

Tabel 12. Lanjutan

1	2	3	4	5	6	7	8
17	1	0,84	1,00	1,07	1,28	1,35	1,38
18	1	0,75	0,86	0,94	1,24	1,29	1,33
19	1	0,69	0,78	0,86	1,21	1,25	1,29
20	1	0,70	0,78	0,78	1,21	1,25	1,25
21	1	0,71	0,69	0,66	1,22	1,21	1,19
22	1	0,60	0,65	0,62	1,16	1,19	1,17
23	1	0,53	0,57	0,58	1,12	1,14	1,15
24	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		Ds Max			1,56	1,56	1,54



Gambar 17 : Grafik kedalaman gerusan 5, 10 dan 15 m dari hulu pilar

Dari tabel dan grafik di atas dapat diketahui besaran kedalaman gerusan maksimum terjadi pada titik (segmen) S12 pada masing-masing pias di hulu pilar sebagai berikut :

- S13 (5 m dari hulu pilar) : 1,56 meter
- S13 (10 m dari hulu pilar) : 1,56 meter
- S13 (15 m dari hulu pilar) : 1,54 meter

b. Gerusan Lokal dengan Metode Colorado State University (CSU)

Persamaan yang digunakan dalam metode ini adalah sebagai berikut :

Diketahui di mana lebar pilar (b) = 1 m, kedalaman (h) = 0,43 m, koefisien bentuk pilar (K_1) = 0,8, koefisien sudut aliran (K_2) = 1,0, koefisien kondisi dasar saluran (K_3) = 1,1 dan bilangan froude (Fr) = 0,68 menggunakan rumus perhitungan kedalaman gerusan (D_s) pada persamaan (7) sebagai berikut :

$$D_s = 2,0 \times 0,43 \times 0,8 \times 1,0 \times 1,1 \left(\frac{1}{0,43} \right)^{0,65} 0,68^{0,43} = 1,22 \text{ m (current meter)}$$
, untuk perhitungan selanjutnya diselesaikan dengan cara yang sama dan hasilnya dapat dilihat pada tabel 12 berikut :

Tabel 13. lanjutan

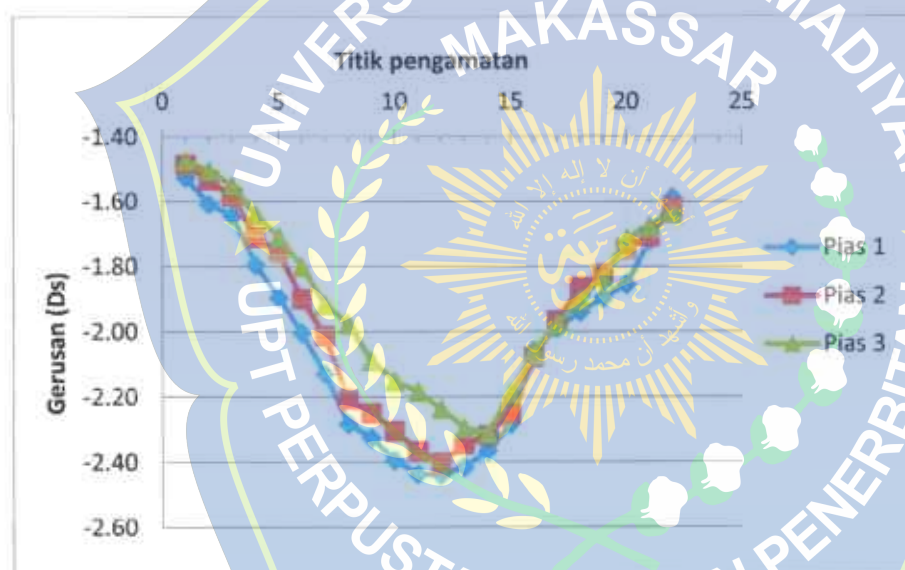
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
19	1	0,69	0,78	0,86	0,80	1,00	1,1	1,45	1,28	1,16	1,01	0,83	0,80	1,55	1,49	1,52
20	1	0,70	0,78	0,78	0,80	1,00	1,1	1,43	1,28	1,28	0,95	0,79	0,80	1,52	1,46	1,47
21	1	0,71	0,69	0,66	0,80	1,00	1,1	1,41	1,45	1,52	0,89	0,79	0,79	1,48	1,40	1,37
22	1	0,60	0,65	0,62	0,80	1,00	1,1	1,67	1,54	1,61	0,86	0,79	0,78	1,38	1,37	1,34
23	1	0,53	0,57	0,58	0,80	1,00	1,1	1,89	1,75	1,72	0,79	0,73	0,78	1,27	1,29	1,31
24	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ds Max														1,95	1,92	1,85



Dari tabel di atas dapat diketahui besaran kedalaman gerusan maksimum terjadi bervariasi di beberapa titik pada masing-masing pias di hulu pilar.

perhitungan kecepatan menggunakan current meter sebagai berikut :

- S12 & S13 (5 m dari hulu pilar) : 1,95 meter
- S13 (10 m dari hulu pilar) : 1,92 meter
- S15 (15 m dari hulu pilar) : 1,85 meter



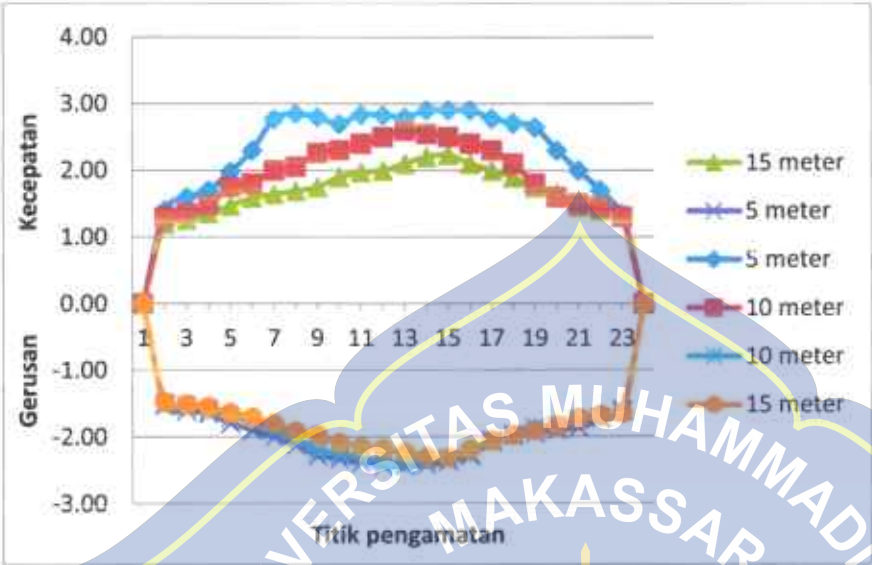
Gambar 18 : Grafik kedalaman gerusan 5, 10 dan 15 m dari hulu pilar

Dari gambar 18 di atas dapat dilihat bahwa gerusan tertinggi yang terjadi pada pias 1 dengan jarak 5 meter di depan pilar terdapat pada titik 12 dan 13 = 1,95 m, pada pias 2 dengan jarak 10 meter gerusan mulai berkurang terdapat pada titik 13 = 1,92 dan semakin berkurang pada jarak tinjau 15 meter di titik 15 = 1,82 m. Ini menunjukkan bahwa semakin dekat dengan pilar maka gerusan yang terjadi juga semakin besar, begitu pun sebaliknya semakin jauh dari pilar maka gerusan semakin kecil.

7. Pengaruh kecepatan aliran (V) terhadap kedalaman gerusan (Ds)

Tabel 14. Pengaruh kecepatan aliran (V) terhadap kedalaman gerusan (Ds)

NO.	Kecepatan (V)			Ds		
	5	10	15	5	10	15
1	2	3	4	5	6	7
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	1,40	1,30	1,20	1,22	1,19	1,18
3	1,60	1,35	1,26	1,29	1,23	1,20
4	1,70	1,48	1,35	1,31	1,27	1,24
5	1,98	1,75	1,47	1,44	1,37	1,31
6	2,30	1,80	1,59	1,52	1,40	1,37
7	2,77	2,00	1,64	1,60	1,52	1,44
8	2,85	2,05	1,69	1,70	1,61	1,53
9	2,80	2,26	1,75	1,83	1,77	1,58
10	2,70	2,30	1,90	1,86	1,80	1,67
11	2,84	2,40	1,97	1,92	1,84	1,72
12	2,83	2,50	2,00	1,95	1,89	1,75
13	2,80	2,60	2,10	1,95	1,92	1,79
14	2,90	2,55	2,20	1,93	1,88	1,84
15	2,90	2,50	2,23	1,89	1,85	1,85
16	2,90	2,40	2,10	1,83	1,80	1,75
17	2,78	2,30	2,00	1,65	1,66	1,65
18	2,71	2,10	1,90	1,59	1,57	1,58
19	2,65	1,80	1,75	1,55	1,49	1,52
20	2,30	1,60	1,65	1,52	1,46	1,47
21	2,00	1,50	1,46	1,48	1,40	1,37
22	1,70	1,45	1,40	1,38	1,37	1,34
23	1,30	1,30	1,35	1,27	1,29	1,31
24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



Gambar 19 : Grafik pengaruh kecepatan aliran (V) terhadap Kedalaman gerusan 5, 10 dan 15 m dari hulu pilar

Dari gambar 19 di atas dapat dilihat bahwa kecepatan aliran berbanding lurus dengan kedalaman gerusan. Semakin tinggi kecepatan aliran maka semakin besar kedalaman gerusan yang terjadi. Hal ini ditunjukkan bahwa nilai gerusan tertinggi pada pias 1 terjadi pada titik 12 dan 13 yang mencapai 1,95 m, pada pias 2 di titik 12 berkurang menjadi 1,92 m dan menjadi 1,82 m pada pias 3 di titik 15.

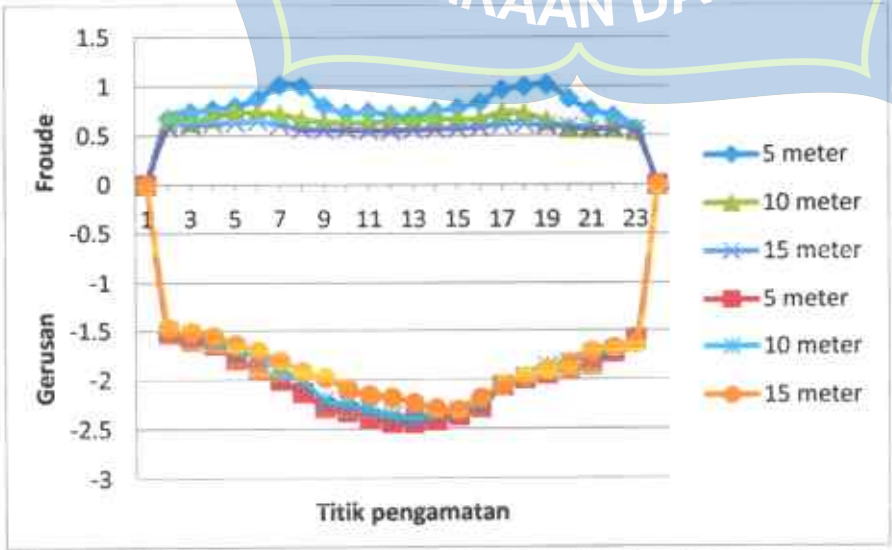
8. Perbandingan antara bilangan froude (Fr) dengan kedalaman gerusan (Ds)

Tabel 15. Hubungan antara bilangan (Fr) dengan gerusan (Ds)

NO.	Froude (Fr)			Gerusan (Ds)		
	5 m	10 m	15 m	5 m	10 m	15 m
1	2	3	4	5	6	7
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,68	0,65	0,59	1,22	1,19	1,18
3	0,74	0,64	0,61	1,29	1,23	1,20

Tabel 15. Lanjutan

1	2	3	4	5	6	7
4	0,77	0,68	0,63	1,31	1,27	1,24
5	0,80	0,74	0,63	1,44	1,37	1,31
6	0,88	0,73	0,65	1,52	1,40	1,37
7	1,01	0,72	0,61	1,60	1,52	1,44
8	1,00	0,67	0,57	1,70	1,61	1,53
9	0,80	0,64	0,56	1,83	1,77	1,58
10	0,73	0,63	0,56	1,86	1,80	1,67
11	0,74	0,64	0,56	1,92	1,84	1,72
12	0,71	0,64	0,55	1,95	1,89	1,75
13	0,70	0,65	0,56	1,95	1,92	1,79
14	0,75	0,67	0,57	1,93	1,88	1,84
15	0,78	0,67	0,57	1,89	1,85	1,85
16	0,84	0,67	0,59	1,83	1,80	1,75
17	0,97	0,73	0,62	1,65	1,66	1,65
18	1,00	0,72	0,63	1,59	1,57	1,58
19	1,02	0,65	0,60	1,55	1,49	1,52
20	0,88	0,58	0,60	1,52	1,46	1,47
21	0,76	0,58	0,57	1,48	1,40	1,37
22	0,70	0,57	0,57	1,38	1,37	1,34
23	0,57	0,55	0,57	1,27	1,29	1,31
24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



Gambar 20 : Hubungan antara bilangan froude dengan kedalaman gerusan Kedalaman gerusan

Dari gambar 19 menunjukkan bilangan froude pada pias 1 perubahan aliran cukup beragam pada titik 7 dan 19 terjadi aliran superkritis dan aliran kritis pada titik pengamatan 8 dan 18, hal ini oleh keberadaan pilar yang mengakibatkan perubahan aliran di sekitarnya.

Dan pada grafik gerusan dapat dilihat pada setiap pias (1, 2 dan 3) gerusan yang tertinggi terdapat pada daerah tengah sungai antara titik 12 sampai titik 15 dan berangsur-angsur berkurang di setiap titik kanan kiri sungai, yang berpengaruh terhadap perubahan kedalaman gerusan yang terjadi di sekitar pilar. Dari grafik menunjukkan bahwa semakin dekat dengan pilar makin gerusan yang terjadi juga semakin besar, begitu pun sebaliknya semakin jauh dari pilar maka gerusa semakin berkurang.

B. Pembahasan Hasil Penelitian

1. Pengaruh Kecepatan Aliran Terhadap Gerusan Lokal Di Sekitar Pilar Jembatan

Proses pengambilan data kecepatan aliran (V) dilakukan pengamatan dengan cara mengambil tiga titik (segmen) yang ditentukan yaitu 5, 10 dan 15 meter di hulu atau depan pilar. Kecepatan aliran (V) diukur dengan menggunakan Flow watch (current meter) dan Bola (manual). Flow watch memberikan data kecepatan secara otomatis terhadap aliran pada saluran untuk titik pengamatan yang ditentukan.

Kecepatan aliran yang terjadi pada saluran mengalami perubahan di sepanjang area pengamatan. Kecepatan aliran di pias 1 titik (segmen) 1 sampai pias 4 pengamatan relatif lambat atau kecil, selanjutnya mengalami peningkatan pada pias 5 sampai pias 7. Pada pias 8 sampai pias 19 merupakan daerah tengah sungai ini mengalami perubahan yang cukup signifikan, dan aliran melambat saat di beberapa titik sebelum pinggir sungai.

Dari hasil uji yang dilakukan dapat diketahui besaran kedalaman gerusan maksimum terjadi bervariasi di beberapa titik pada masing-masing pias di hulu pilar.

Dari hasil perhitungan dengan menggunakan 2 (dua) metode Laursen dan Touch, dan Colorado State University (CSU) hal ini dapat dilihat bahwa kecepatan aliran berbanding lurus dengan kedalaman gerusan, Semakin besar nilai kecepatan aliran maka gerusan lokal yang terjadi juga akan semakin besar.

2. Pengaruh Karakteristik Aliran Terhadap Gerusan Lokal Di

Sekitar Pilar Jembatan

Dari hasil uji yang dilakukan pada perhitungan bilangan Froude (Fr) karakteristik aliran yang didapatkan rata-rata mengalami aliran subkritis karena nilai bilangan froudenya lebih kecil dari 1, hal ini dipengaruhi oleh kecepatan aliran di beberapa titik awal pengamatan di sungai yang relatif lambat atau kecil. Aliran sungai mengalami aliran kritis saat memasuki

daerah tengah sungai pada beberapa titik seperti titik 7 dan 17 karena nilai bilangan froudenya sama dengan 1, hal ini dipengaruhi karena titik ini tepat berada 5 meter dari hulu/depan pilar jembatan.

Berdasarkan hasil perhitungan dengan menggunakan 2 (dua) metode Laursen dan Touch, dan Colorado State University (CSU) dapat dilihat bahwa kedalaman gerusan lokal yang terjadi di sekitar pilar juga sangat dipengaruhi oleh karakteristik aliran.



BAB V

PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Kecepatan aliran berbanding lurus dengan kedalaman gerusan, Semakin besar nilai kecepatan aliran maka gerusan lokal yang terjadi di sekitar pilar juga semakin besar. Kedalaman gerusan tertinggi mencapai 1,56 m dengan titik pengamatan jarak 5 meter depan/hulu pilar menggunakan metode Laursen dan Toch, dan 1,95 m dengan metode Colorado State University (CSU). Sebaliknya semakin kecil nilai kecepatan aliran maka gerusan lokal yang terjadi juga kecil.
2. Karakteristik aliran atau bilangan Froude (Fr) juga sangat berpengaruh terhadap gerusan di sekitar pilar jembatan. Pada pias 1 dengan jarak tinjau 5 meter dari hulu pilar aliran berubah menjadi aliran superkritis dan kritis di beberapa titik pengamatan, hal ini dipengaruhi karena posisi titik tepat berada di depan 5 meter dari hulu pilar jembatan. Sedangkan kedalaman gerusan berkurang pada pias 2 dan 3 yang berjarak 10 dan 15 meter dari pilar, ini disebabkan karena jarak pilar yang cukup jauh dari titik pengamatan.

B. Saran

Dari pengalaman pada penelitian ini penulis memberikan saran untuk penelitian lebih lanjut, yaitu:

1. Untuk penelitian selanjutnya sebaiknya penentuan titik pengamatan atau titik pengambilan data (pias) harus lebih rapat dan lebih banyak agar data yang diperoleh juga bisa lebih jelas dan akurat.



DAFTAR PUSTAKA

- Afdal, M., & Haq, E., U. (2020). *Analisis Gerusan Lokal Pada Pilar Jembatan Moncongloe Kabupaten Gowa Sulawesi Selatan*. Teknik Sipil SI. Jurusan : Teknik Sipil Pengairan.
- Chow, V. T. (1992). *Hidrolika Saluran Terbuka (Open Channel Hydraulic)*. Erlangga : Jakarta.
- Putra, T. D., Fatimah, E., & Azmeri. (2018). *Pengaruh Pilar Jembatan Pango Terhadap Pola Aliran Sungai Krueng Aceh*. Hidrologi, Lingkungan dan Struktur, 01(04), 1-14.
- Sanjaya, Liani. 2017. *Bab III Landasan Teori Gerusan Lokal*. <https://docplayer.info/55150347-Bab-iii-landasan-teori-a-gerusan-lokal.html> (diakses tanggal 28 September 2020).
- Sarwono. (2016). *Studi Karakteristik Gerusan Lokal Pada Beberapa Tipe Pilar Jembatan*. Sumber Daya Air, 12(01), 1-12.
- Setiati, N. R., Guntorojati, I., & Kurniawan, E. (2019). *Analysis Of River Flow Scouring Hazard Countermeasures On Bridge Pier Structures*. Jurnal Jalan Jembatan, 36(01), 1-13.
- Setyandito, O., Pierre, A. J., Juliastuti, Nataatmadja, A. D., & Michael, A. (2019). *Pemodelan Potensi Gerusan Dasar Pada Struktur Bawah Jembatan*. Teknologi Terapan Inovasi Dan Rekayasa, 1-9.
- Shaskia, N., & Rizalrhadi, M. (2019). *Pola Gerusan Lokal Akibat Perlakuan Pada Abutmen Jembatan*. 8(02), 1-8.
- Sucipto. (2011). *Pengaruh Kecepatan Aliran Terhadap Gerusan Lokal Di Sekitar Pilar Jembatan*. 01(13), 51-60.
- Sukri, A. S., Muriadin., & Rosliana, I. (2018). *Uji Laboratorium Kedalaman Gerusan Pada Pilar Perancah Jembatan Pasar Baru*. Jurnal Stabilita, 6(02), 1-9.
- Suma, M. F., Halim, F., & Hendratta, L. A. (2018). *Analisis Gerusan Lokal Pada Pilar Jembatan Kuwil Kabupaten Minahasa Utara Menggunakan Metode Empiris*. Jurnal sipil statik, 6(11), 1-12.
- Triyadhi, F., Harsanto, P., & Ikhsan, J., (2017). *Analisis Numerik Pengaruh Aliran Debris Terhadap Gerusan Lokal Pada Pilar Menggunakan Software Iric : Nays 2DH 1.0*. 1-9.
- Warliawati, S., Rusdin, A., & Saparuddin. (2017). *Gerusan Di Sekitar Pilar Jembatan Palu I Sungai Palu*. Prosiding Seminar Hasil Penelitian (SNP2M), 1-5.
- Wibowo, Liani. 2017. *Bab III Landasan Teori Pola Aliran*. <https://docplayer.info/48582862-Bab-iii-landasan-teori-a-pola-aliran.html> (diakses 27 September 2020).

Wiyono, A., Soekarno, I., & Egon, A. (2006). *Perbandingan Beberapa Formula Perhitungan Gerusan Di Sekitar Pilar (Kajian Laboratorium)*.





Dokumentasi



Pengukuran kedalaman



Pengukuran kecepatan



Pengukuran lebar pilar