

**ANALISIS GERUSAN LOKAL SERTA UPAYA PENGENDALIANNYA
PADA PILAR DAN ABUTMEN JEMBATAN WAY SUMANDA–
SUKAMULYA KECAMATAN PUGUNG, KABUPATEN TANGGAMUS**

(Tesis)

Oleh

**SUHARNI
NPM 2325011019**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

**ANALISIS GERUSAN LOKAL SERTA UPAYA PENGENDALIANNYA
PADA PILAR DAN ABUTMEN JEMBATAN WAY SUMANDA–
SUKAMULYA KECAMATAN PUGUNG, KABUPATEN TANGGAMUS**

Oleh:

SUHARNI

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
MAGISTER TEKNIK

Pada

Program Studi Magister Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Lampung



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

ANALISIS GERUSAN LOKAL SERTA UPAYA PENGENDALIANNYA PADA PILAR DAN ABUTMEN JEMBATAN WAY SUMANDA- SUKAMULYA KECAMATAN PUGUNG, KABUPATEN TANGGAMUS

Oleh

SUHARNI

Jembatan merupakan salah satu prasarana transportasi yang sangat penting. Manfaat jembatan diantaranya: mempersingkat waktu perjalanan, menghemat biaya transportasi, mendukung kegiatan ekonomi dan menunjang pembangunan. Mengingat pentingnya peranan jembatan, maka keamanannya harus diperhatikan. Permasalahan yang sering terjadi pada jembatan melintang sungai adalah kegagalan struktur bawah jembatan akibat gerusan lokal. Jembatan Way Sumanda-Sukamulya melintasi Sungai Way Tebu di Desa Sumanda, Kecamatan Pugung, Kabupaten Tanggamus. Kondisinya mengalami gerusan pada pilar dan daerah sekitar abutmen. Tujuan penelitian ini adalah merekomendasikan alternatif struktur pengendali gerusan berdasarkan hasil analisis gerusan dengan Program HEC-RAS dan menganalisis hubungan debit banjir dengan besarnya gerusan lokal pada jembatan.

Survei dilakukan untuk memperoleh data topografi, debit sesaat, serta gradasi sedimen dasar. Data curah hujan Tahun 2012 - 2022 pada stasiun R.011 dan PH.020 didapat dari BBWS Mesuji-Sekampung. Data lainnya didapat dari dinas/instansi terkait. Analisis hidrolika untuk mengkalibrasi besaran koefisien manning dengan kondisi lapangan. Analisis gerusan menggunakan HEC-RAS 1D berdasarkan hasil analisis hidrologi, topografi, butiran sedimen dan analisis hidrolika.

Hasil analisis menunjukkan bahwa kedalaman gerusan pilar berkisar antara 1,60 m - 1,89 m, sedangkan gerusan abutmen sebesar 0,33 m – 1,02 m pada abutmen kiri dan 2,28 m - 3,25 m pada abutmen kanan. Besarnya kedalaman gerusan tersebut meningkat secara logaritmik seiring dengan meningkatkannya debit banjir kala ulang. Semakin tinggi debit banjir maka kedalaman gerusan lokal semakin besar. Salah satu alternatif untuk pengendalian gerusan Jembatan Way Sumanda–Sukamulya adalah struktur batuan riprap kelas II dengan D_{50} sebesar 0,229 m, tebal sebesar 1,03 m untuk riprap pilar dan 0,5 m untuk riprap abutmen.

Kata Kunci: Debit Banjir, Gerusan Lokal, HEC-RAS, Jembatan, Struktur Riprap.

ABSTRACT

ANALYSIS OF LOCAL SCOUR AND ITS CONTROL EFFORTS ON THE PIER AND ABUTMENTS OF THE WAY SUMANDA-SUKAMULYA BRIDGE, PUGUNG SUB-DISTRICT, TANGGAMUS REGENCY

By

SUHARNI

The bridge is one of the most important infrastructure for transportation. The benefits of bridges such as: shortening travel time, saving transportation costs, supporting economic activities and supporting development. Remind the important role of the bridge, so its safety must be considered. The problem that often occurs on bridges across rivers is the failure of the structure under the bridge due to local scour. The Way Sumanda-Sukamulya Bridge acrossing the Way Tebu River in Sumanda Village, Pugung District, Tanggamus Regency. The condition is experiencing scour on the pier and the area around the abutments. The purpose of this research is to recommend alternative scour control structures based on the results of scour analysis with the HEC-RAS Program and analyzing the relationship between flood discharge and the magnitude of local scour on the bridge.

Survey activities was conducted to obtain topographic data, instantaneous discharge, and basic sediment gradation. Rainfall data for 2012 - 2022 at stations R.011 and PH.020 were obtained from BBWS Mesuji-Sekampung. Other data are obtained from related agencies. Hydraulics analysis used to calibrate the amount of manning coefficient with field conditions. Scour analysis using HEC-RAS 1D based on the results of hydrological analysis, topography, sediment grains and hydraulics analysis.

The analysis results show that the scour depth of the pier ranges from 1.60 m - 1.89 m, while the left abutment scour is 0.33 m - 1.02 m and 2.28 m - 3.25 m on the right abutment. The magnitude of the scour depth increases logarithmically along with the increase of the flood discharge of the return period. The higher the flood discharge, the greater the depth of local scour. One alternative for scour control of the Way Sumanda-Sukamulya Bridge is a riprap rock structure class II with a D_{50} of 0.229 m, 1.03 m thickness for pier riprap and 0.5 m for abutment riprap.

Keywords: flood Discharge, Local Scour, HEC-RAS, Bridge, Riprap Structure.

Judul Tesis

**: ANALISIS GERUSAN LOKAL SERTA UPAYA
PENGENDALIANNYA PADA PILAR DAN
ABUTMEN JEMBATAN WAY SUMANDA -
SUKAMULYA KECAMATAN PUGUNG,
KABUPATEN TANGGAMUS**

Nama Mahasiswa

: Suharni

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2325011019

Program Studi

: Magister Teknik Sipil

Fakultas

: Teknik



Dr. Ir. Endro P. Wahono, S.T., M.Sc.
NIP 19700129 199512 1 001

Prof. Dr. Dyah Indriana K., S.T., M.Sc.
NIP 19691219 199512 2 001

2. Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil

Dr. H. Ahmad Herison, S.T., M.T.
NIP-19691030 200003 1 001

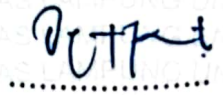
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Dr. Ir. Endro P. Wahono, S.T., M.Sc.



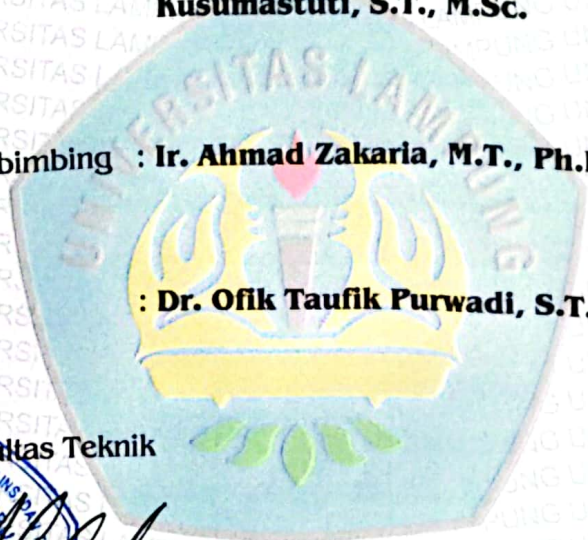
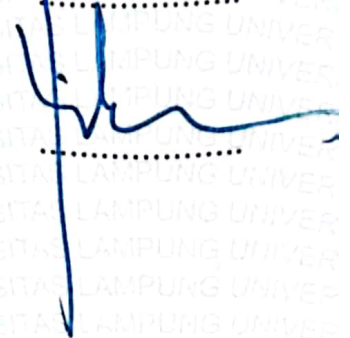
Sekretaris : Prof. Dr. Dyah Indriana Kusumastuti, S.T., M.Sc.



Penguji Bukan Pembimbing : Ir. Ahmad Zakaria, M.T., Ph.D.



: Dr. Ofik Taufik Purwadi, S.T., M.T.



2. Dekan Fakultas Teknik



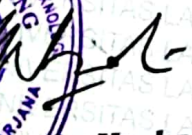
Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. →
NIP. 19750928 200112 1 002



3. Direktur Program Pascasarjana



Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.
NIP. 19640326 198902 1 001



4. Tanggal Lulus Ujian Tesis : 17 Januari 2025

LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : SUHARNI

NPM : 2325011019

Program Studi : Magister Teknik Sipil.

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang berjudul “Analisis Gerusan Lokal Serta Upaya Pengendaliannya Pada Pilar dan Abutmen Jembatan Way Sumanda–Sukamulya Kecamatan Pugung, Kabupaten Tanggamus” adalah:

1. Karya sendiri, kecuali kutipan dan ringkasan atas karya orang lain yang telah saya sebutkan sumbernya dan saya tulis sesuai dengan kaidah ilmiah yang berlaku dalam masyarakat akademik.
2. Sepengetahuan saya, karya tesis ini bukan merupakan duplikasi tesis yang dibuat oleh orang lain atau jiplakan karya tulis orang lain dan bukan hasil terjemahan dari karya tulis orang lain.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, apabila dikemudian hari ditemukan adanya ketidakbenaran atas pernyataan saya ini, maka saya bersedia menanggung akibat dan sanksi yang ditimbulkan.

Bandar Lampung, 17 Januari 2025
Yang Membuat Pernyataan



SUHARNI
NPM: 2325011019

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Gisting, Kabupaten Tanggamus pada Tanggal 06 Maret 1982, anak pertama dari 2 bersaudara pasangan Bapak Mujito dan Ibu Wagirah. Istri dari Darsono, S.Tp. dan Ibu dari 4 orang anak Ahmad Uthman Faiz, Aisyah Ulya Rahma, Muhammad Fachrul Abqory dan Machfudzoh Nurul Fatimah. Penulis menyelesaikan pendidikan di SD Negeri 6 Gisting Atas Tanggamus pada Tahun 1994, SMP Negeri 2 Talang Padang Tanggamus pada Tahun 1997, SMU Negeri I Talang Padang Tanggamus Jurusan IPA pada Tahun 2000. Kemudian selepas SMU, pada Tahun 2000 penulis melanjutkan pendidikan Strata I (S1) di Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung (Unila) melalui jalur Penelusuran Kemampuan Akademik dan Bakat (PKAB). Penulis menyelesaikan pendidikan Strata I (S1) pada Tahun 2005, dan terdaftar sebagai mahasiswa Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Lampung pada Tahun 2023.

Saat ini penulis tercatat sebagai pegawai Pranata Laboratorium Pendidikan pada Program Study Teknologi Rekayasa Konstruksi Jalan dan Jembatan (TRKJJ) Politeknik Negeri Lampung, juga sebagai Tenaga Ahli pada CV. Sahabat Alam Konsultan dan CV. *Flow Consultant*. Penulis juga pernah bekerja di Perusahaan BUMN PT. Waskita Karya (persero) pada proyek Irigasi Batang Hari PLB paket 4 (Lot-2) Sumatera Barat, bekerja di PT. Murni Jaya Sempurna pada *Way Sekampung Irrigation Project Civil Work Phase (III) On Farm Irrigation System and Land Development of Bekri Lot 6A*, Koordinator Provinsi Program Nasional Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) Perdesaan Provinsi Lampung, Senior Fasilitator pada Program Nasional Penyediaan Air Minum dan Sanitasi Berbasis Masyarakat (Pamsimas) di Provinsi Lampung, juga Program *Rural Infrastructure Support (RIS)* PNPM Mandiri di Provinsi Lampung

MOTTO

Sesungguhnya Sesudah Kesulitan Itu Ada Kemudahan. Dan Hanya
Kepada Tuhanmu Lah Hendaknya Kamu Berharap.
(Q.S. Al-Insyirah: 6,8)

... Niscaya Allah Meninggikan Orang-Orang Yang Beriman dan
Orang-Orang Berilmu Beberapa Derajat.
(Q.S. Al-Mujadalah: 11)

"Jika Kamu Tidak Sanggup Menahan Lelahnya Belajar Maka Kamu
Harus Sanggup Menahan Perihnya Kebodohan"
(Imam Syafi'i)

"Pendidikan adalah senjata paling kuat yang dapat digunakan untuk
mengubah dunia."
(Nelson Mandela)

Bismillahirohmanirrohim, Teriring Do'a, Cinta dan Kasih Sayang

Kupersembahkan Karya ini
Teruntuk:

Kedua Orang Tuaku Tersayang dan Suamiku Tercinta

Ridho Allah tergantung dengan Ridho-mu

Anak Anak-Ku tersayang Ahmad Uthman Faiz, Aisyah Ulya Rahma,

Muhammad Fachrul Abqory dan Machfudzoh Nurul Fatimah

Terselip Doa dan Harapan InsyaAllah kalian akan berada pada pencapaian yang

lebih baik dan dalam penjagaan Allah selalu

Saudaraku Ridwan Redi Putra dan Nyamin Sutrisno serta keluarga besarku

Tersayang

Keluarga Besar Prodi Teknologi Rekayasa Kontruksi Jalan dan Jembatan

(TRKJ) Politeknik Negeri Lampung, CV. Sahabat Alam Konsultan, CV. *Flow*

Consultant dan Semua Temanku

Terimakasih atas Doa, support, pengertian dan kebersamaan yang indah

Almamater tercinta, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung.

SANWACANA

Puji syukur kehadirat Allah S.W.T. atas Rahmat, Ridho, dan Karunia-Nya sehingga penulisan tesis ini dapat selesai dengan baik. Tesis yang berjudul **“Analisis Gerusan Lokal Serta Upaya Pengendaliannya Pada Pilar dan Abutmen Jembatan Way Sumanda–Sukamulya Kecamatan Pugung, Kabupaten Tanggamus”** disusun sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik pada Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Lampung.

Tesis ini dapat diselesaikan berkat bantuan, bimbingan, arahan dan doa dari semua pihak sejak proses perkuliahan sampai terselesaikannya tesis ini. Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada yang terhormat:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si. selaku Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung;
2. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung;
3. Bapak Dr. H. Ahmad Herison, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Ir. Endro Prasetyo Wahono, S.T., M.Sc. selaku Pembimbing Utama yang telah meluangkan waktu dengan penuh sabar dan telaten, membimbing, mengarahkan, mensupport sejak awal perkuliahan hingga terselesaikannya tesis ini;
5. Ibu Prof. Dr. Dyah Indriana Kusumastuti, S.T., M.Sc. selaku Pembimbing Kedua atas support, bimbingan, saran, dan arahan selama proses perkuliahan hingga penyelesaian tesis ini;
6. Bapak Ir. Ahmad Zakaria, M.T., Ph.D. selaku Penguji Pertama dengan penuh kesabaran memberikan masukan dan saran-saran selama proses perkuliahan hingga penyelesaian tesis ini;

7. Bapak Dr. Ofik Taupik Purwadi, S.T., M.T. selaku penguji kedua atas waktu yang diberikan, masukan dan saran selama penyusunan tesis ini;
8. Bapak dan Ibu Dosen Magister Teknik Sipil Universitas Lampung yang telah membekali penulis dengan ilmu, nilai-nilai luhur, bimbingan, arahan, dan motivasi selama mengikuti perkuliahan;
9. Tim surveyor tesis penulis dan tim teknisi Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Lampung yang telah membantu dalam penelitian.
10. Staf administrasi dan karyawan Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung yang telah banyak membantu dalam kegiatan administrasi selama penulis menempuh studi;
11. Bapak, Mamak yang tak pernah henti selalu menyertai dalam doa, serta kedua saudara-ku tersayang Ridwan Redi Putra dan Nyamin Sutrisno serta seluruh keluarga besar yang senantiasa memberi doa restu dan kasih sayangnya;
12. Suami tercinta Darsono, S.Tp. serta anak-anakku tersayang Ahmad Uthman Faiz, Aisyah Ulya Rahma, Muhammad Fachrul Abqory dan Mahfudzoh Nurul Fatimah yang selalu mengerti, mendoakan, memotivasi dan melimpahkan cinta dan kasih sayang yang tak terhingga, terimakasih atas semuanya;
13. Seluruh teman-teman Magister Teknik Sipil Universitas Lampung terspesial angkatan 2023 dan Magister Teknik Sipil Konsentrasi Hidro Angkatan 2023 terimakasih atas kebersamaan dan kekeluargaanya;
14. Keluarga besar Program Studi Teknologi Rekayasa Kontruksi Jalan dan Jembatan (TRKJJ) Politeknik Negeri Lampung, keluarga besar Sahabat Alam Konsultan, dan CV. *Flow Consultant*, terimakasih atas pengertian, suport dan rasa kekeluargaanya.
15. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Besar harapan penulis, semoga tesis ini dapat bermanfaat dalam memberikan sumbangsih ilmu pengetahuan bagi penulis khususnya dan pembaca pada umumnya.

Bandar Lampung, Januari 2025

SUHARNI

DAFTAR ISI

	Halaman
SANWACANA	ii
DAFTAR ISI.....	iv
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Batasan Masalah.....	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1. Sungai.....	6
2.1.1. Alur Sungai.....	6
2.1.2. Morfologi Sungai.....	7
2.2. Aliran Melalui Saluran Terbuka.....	10
2. 2.1. Klasifikasi Aliran Saluran Terbuka.....	10
2. 2.2. Geometri Saluran Terbuka.....	11
2. 2.3. Distribusi Kecepatan Aliran.....	12
2.3. <i>Transport Sediment</i>	13
2. 3.1. Bentuk dan Ukuran Sedimen.....	15
2. 3.2. Awal Gerak Butiran.....	16
2. 3.3. Analisis Sedimen Dasar.....	17
2.4. Gerusan (<i>Scouring</i>).....	18
2.4.1 Gerusan pada Jembatan.....	20

2.4.2	Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Gerusan Lokal	23
2.4.3	Estimasi Kedalaman Gerusan Lokal.....	25
2.5.	Analisis Hidrologi.....	30
2.5.1.	Curah Hujan Kawasan (<i>Areal Rainfall</i>).....	31
2.5.2.	Curah Hujan Rencana	33
2.5.3.	Analisis Frekuensi.....	33
2.5.4.	Uji Kesesuaian Distribusi	37
2.5.5.	Debit Banjir Rencana.....	38
2.6.	Struktur Pengendali Gerusan	41
2.6.1.	Rip-rap	41
2.6.2.	Bronjong (Gabion).....	44
2.6.3.	<i>Groundsill</i> (Ambang Dasar Sungai).....	44
2.6.4.	Krib/Groyn.....	45
2.7.	Penelitian Terdahulu.....	46
III.	METODOLOGI PENELITIAN	52
3.1.	Lokasi Penelitian	52
3.2.	Jenis Data dan Metode Pengumpulan Data	53
3.2.1.	Jenis Data.....	53
3.2.2.	Metode Pengumpulan Data.....	54
3.3.	Metode Analisis Data	55
3.3.1.	Analisis Hidrologi.....	55
3.3.2.	Analisis Data Topografi.....	55
3.3.3.	Analisis Gradasi Butiran.....	56
3.3.4.	Analisis Hidrolika	57
3.3.5.	Analisis Gerusan	57
3.3.6.	Perancangan Struktur Pengendali Gerusan.....	57
3.4.	Bagan Alir Penelitian.....	58
IV.	PEMBAHASAN	59
4.1	Analisis Hidrologi.....	59
4.1.1.	Daerah Tangkapan Air.....	59
4.1.2.	Data Hidrologi	60
4.1.3.	Curah Hujan Harian Rata-Rata Maksimum.....	62
4.1.4.	Curah Hujan Rencana	64
4.1.5.	Intensitas Curah Hujan.....	70

4.1.6.	Debit Banjir Rencana.....	72
4.2	Analisis Topografi	78
4.2.1.	Pengukuran Topografi	78
4.2.2.	Hasil Pengukuran Topografi.....	79
4.3	Analisis Gradasi Butiran.....	81
4.3.1.	Pengambilan <i>Sample</i> Sedimen.....	81
4.3.2.	Analisis Gradasi Butiran.....	84
4.4	Analisis Hidrolika.....	99
4.4.1.	Skema Geometri Alur Sungai.....	100
4.4.2.	Potongan Melintang (<i>Cross Section</i>) Sungai.....	100
4.4.3.	Data Jembatan.....	101
4.4.4.	<i>Steady Flow</i> Data.....	102
4.4.5.	Kalibrasi Koefisien <i>Manning</i>	103
4.5	Analisis Gerusan.....	107
4.5.1.	<i>Contraction Scour</i>	107
4.5.2.	Gerusan Pada Pilar Jembatan (<i>Pier Scour</i>).....	108
4.5.3.	Gerusan Pada Abutmen Jembatan (<i>Abutment Scour</i>).....	110
4.5.4.	Analisis Gerusan Lokal.....	112
4.6	Alternatif Pengendalian Gerusan.....	123
4.6.1.	Desain Riprap Pilar.....	124
4.6.2.	Desain Riprap Abutmen.....	134
V.	SIMPULAN DAN SARAN	138
5.1.	Simpulan.....	138
5.2.	Saran	139
	DAFTAR PUSTAKA	

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Klasifikasi butiran menurut AGU (<i>American Geophysical Union</i>).....	16
Tabel 2. Faktor koreksi bentuk pilar K_1	25
Tabel 3. Faktor koreksi koefisien sudut aliran K_2	26
Tabel 4. Faktor koreksi kondisi dasar saluran K_3	26
Tabel 5. Nilai K_1	29
Tabel 6. Karakteristik distribusi frekuensi	35
Tabel 7. Penelitian sejenis dalam lima tahun terakhir.....	47
Tabel 8. Curah hujan maksimum harian Stasiun PH.020	61
Tabel 9. Curah hujan maksimum harian Stasiun R.011	61
Tabel 10. Faktor Poligon <i>Thiessen</i>	63
Tabel 11. Curah hujan harian maksimum rata-rata.....	63
Tabel 12. Perhitungan parameter statistik.....	64
Tabel 13. Ketentuan dalam pemilihan jenis distribusi	66
Tabel 14. Perhitungan Uji Chi-Kuadrat	67
Tabel 15. Uji Smirnov-Kolmogorov hasil perhitungan	68
Tabel 16. Parameter statistik Metode Log Pearson III.....	69
Tabel 17. Curah hujan rencana Metode Log Pearson III	70
Tabel 18. Intensitas hujan jam-jaman	71
Tabel 19. Perhitungan nilai koefisien limpasan	73
Tabel 20. Debit banjir rencana Metode Rasional.....	73
Tabel 21. Hasil perhitungan unit hidrograf Metode Nakayasu	75
Tabel 22. Hasil perhitungan debit rencana Metode Nakayasu.....	76
Tabel 23 Rekapitulasi debit banjir rencana Sub DAS Way Tebu	77
Tabel 24. Klasifikasi tanah menurut USCS	85
Tabel 25. Hasil perhitungan analisis saringan sedimen hulu jembatan	87
Tabel 26. Hasil perhitungan analisis saringan sedimen as jembatan	88

Tabel 27. Hasil perhitungan analisis saringan sedimen hilir jembatan.....	89
Tabel 28. Jenis butiran sedimen hulu jembatan	91
Tabel 29. Jenis butiran sample sedimen as jembatan.....	92
Tabel 30. Jenis butiran sample sedimen hilir jembatan	93
Tabel 31. Diameter butiran lolos saringan sedimen hulu.....	95
Tabel 32. Jenis gradasi butiran sedimen hulu jembatan.....	96
Tabel 33. Diameter butiran lolos saringan sedimen as jembatan.....	97
Tabel 34. Jenis gradasi butiran sedimen as jembatan	97
Tabel 35. Diameter butiran lolos saringan sedimen hilir jembatan	99
Tabel 36. Jenis gradasi butiran sedimen hilir jembatan	99
Tabel 37. Hasil perhitungan debit sesaat penampang sungai.....	104
Tabel 38. Kedalaman gerusan pilar (<i>pier scour</i>).....	116
Tabel 39. Kedalaman gerusan abutmen jembatan.....	117
Tabel 40. Kelas butiran riprap.....	126
Tabel 41. Diameter butiran dan Nilai Cu lapisan filter dan <i>base</i>	129

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1 Jembatan Way Sumanda–Sukamulya (a), Gerusan Abutmen (b), Gerusan Pilar (c).....	2
Gambar 2. Sungai bercabang (<i>braided river</i>)	9
Gambar 3. Skema Sungai Meander.....	9
Gambar 4. Kurva kecepatan penampang saluran pada berbagai.....	12
Gambar 5. Distribusi kecepatan pada saluran terbuka	13
Gambar 6. Skema angkutan sedimen melalui dua tampang sungai	15
Gambar 7. Tipe gerusan yang dapat terjadi di jembatan.....	20
Gambar 8. Mekanisme gerusan abutmen	22
Gambar 9. Mekanisme pembentukan gerusan lokal pada pilar jembatan.....	23
Gambar 10 Poligon Isohyet.....	32
Gambar 11 Hidrograf Satuan Sintetik Nakayasu	40
Gambar 12 Lokasi Jembatan Way Sumanda–Sukamulya	52
Gambar 13. Diagram alir penelitian.....	58
Gambar 14. Peta Daerah Tangkapan Air	60
Gambar 15. <i>Polygon Thiessen</i>	62
Gambar 16. Curah hujan maksimum harian rata-rata	64
Gambar 17. Intensitas hujan jam-jaman.....	71
Gambar 18. Peta tutupan lahan	72
Gambar 19. Grafik HSS Nakayasu Sub DAS Way Tebu	75
Gambar 20. Hidrograf banjir Metode Nakayasu.....	77
Gambar 21. Pengukuran topografi sungai dan jembatan	78
Gambar 22. Peta situasi sungai di lokasi jembatan	79
Gambar 23. <i>Cross Section</i> 100 meter hilir jembatan	79
Gambar 24. <i>Cross Section</i> 50 meter hilir jembatan	80
Gambar 25. <i>Cross Section</i> pada As jembatan	80

Gambar 26. <i>Cross Section</i> pada 50 meter hulu jembatan	80
Gambar 27. <i>Cross Section</i> pada 100 meter hulu jembatan	80
Gambar 28. Potongan melintang Jembatan Way Sumanda-Sukamulya.....	81
Gambar 29. Pengambilan sample sedimen dasar	82
Gambar 30. Sample sedimen Sungai Way Tebu.....	83
Gambar 31. Uji analisis saringan (<i>sieve analysis</i>)	84
Gambar 32. Grafik gradasi butiran sedimen hulu jembatan	94
Gambar 33. Grafik gradasi butiran sedimen as jembatan	96
Gambar 34. Grafik gradasi butiran sedimen hilir jembatan.....	98
Gambar 35. Skema geometri Sungai Way Tebu.....	100
Gambar 36. <i>Cross section</i> Sungai Way Tebu Sta 0+94	101
Gambar 37. Pemodelan Jembatan Way Sumanda-Sukamulya	102
Gambar 38. <i>Steady flow</i> data Sungai Way Tebu.....	103
Gambar 39. Segmen pengukuran debit sesaat.....	104
Gambar 40. Debit sesaat sebagai input <i>steady flow</i> data dalam HEC-RAS.....	105
Gambar 41. Kalibrasi tinggi muka air dengan HEC-RAS	106
Gambar 42. Menu <i>Hydraulic Design</i> pada menu utama HEC-RAS.....	107
Gambar 43. Input data contraction scour	108
Gambar 44. Input data <i>pier scour</i>	110
Gambar 45. Input data <i>abutment scour</i>	112
Gambar 46. Kedalaman gerusan debit kala ulang dua tahun (Q_2).....	113
Gambar 47. Kedalaman Gerusan debit kala ulang lima tahun (Q_5).....	113
Gambar 48. Kedalaman gerusan debit sepuluh tahun (Q_{10}).....	114
Gambar 49. Kedalaman gerusan debit dua puluh lima tahun (Q_{25}).....	114
Gambar 50. Kedalaman gerusan debit lima puluh tahun (Q_{50}).....	115
Gambar 51. Kedalaman gerusan debit kala seratus tahun (Q_{100}).....	115
Gambar 52. Gerusan pilar, abutmen kanan dan abutmen kiri.....	118
Gambar 53. Kedalaman gerusan abutmen kanan dan kiri.....	119
Gambar 54. Posisi jembatan berada di belokan sungai bagian luar	120
Gambar 55. Hubungan debit dan kedalaman gerusan pilar	121
Gambar 56. Hubungan debit dan kedalaman gerusan abutmen kanan	122
Gambar 57. Hubungan debit dan kedalaman gerusan abutmen kiri	122

Gambar 58. Gradasi butiran tanah dasar dan filter	129
Gambar 59. Bagan desain filter butiran Cistin-Ziems	130
Gambar 60. Tampak atas sketsa desain riprap pilar.....	134
Gambar 61. Potongan A-A riprap pilar.....	134
Gambar 62. Tampak atas sketsa desain riprap abutmen	137
Gambar 63. Potongan A-A riprap abutmen	137

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jembatan merupakan salah satu prasarana transportasi yang sangat penting bagi kehidupan (Kementerian PUPR RI, 2022). Jembatan menghubungkan rute perjalanan yang terpisah oleh adanya letak geografi baik berupa alam maupun buatan. Rintangan alam dapat berupa sungai, lembah, danau, atau laut. Sedangkan rintangan buatan dapat berupa jalan raya, jalan rel, dan perlintasan lainnya (Kementerian PUPR RI, 2021). Manfaat jembatan antara lain: 1) membuat waktu perjalanan darat yang terpisah menjadi lebih singkat, 2) menghemat biaya perjalanan, 3) mempermudah pergerakan arus barang dan jasa, 4) mendukung kegiatan ekonomi, 5) menunjang pembangunan negara. Dari perspektif kewilayahan, jembatan mempermudah daerah tertinggal untuk terhubung dengan daerah lain.

Mengingat pentingnya peranan jembatan, maka keamanan jembatan mutlak harus diperhatikan, baik keamanan struktur atas maupun struktur bagian bawah. Struktur atas jembatan yaitu bagian konstruksi jembatan yang berfungsi menerima langsung beban lalu lintas. Sedangkan struktur jembatan bagian bawah adalah konstruksi jembatan yang berfungsi memikul beban bangunan atas untuk diteruskan ke pondasi selanjutnya diteruskan ke tanah dasar. Struktur jembatan bagian bawah terdiri dari pondasi, abutmen dan pilar (Apriliani et al., 2020).

Menurut Istiarto (2011) dalam artikelnya yang berjudul "Problematika Jembatan di Sungai", permasalahan yang sering terjadi pada jembatan yang melintas di atas sungai adalah kegagalan struktur bawah dalam mendukung jembatan. Faktor utama kegagalan struktur bawah tersebut diantaranya karena penurunan (*degradasi*) dasar sungai dan juga gerusan lokal pada pondasi/pilar

jembatan. Kegagalan struktur jembatan pada beberapa kasus dapat mengakibatkan keruntuhan jembatan. Menurut Kementerian PUPR RI (2021), pengaruh aliran air sungai dapat menyebabkan terjadinya gerusan lokal pada pilar jembatan akibat pusaran air (*vortex system*) karena adanya gangguan pola aliran yang terhalang oleh bangunan yang melintang sungai seperti pilar dan abutmen jembatan. Gerusan lokal dapat mempengaruhi keamanan struktur jembatan, sehingga perlu diwaspadai.

Jembatan Way Sumanda - Sukamulya terletak di Desa Sumanda, Kecamatan Pugung, Kabupaten Tanggamus, Provinsi Lampung. Tepatnya pada koordinat $5^{\circ}23'21.41''\text{S}$, $104^{\circ}48'36.27''\text{E}$. Berdasarkan data jembatan Pemerintah Kabupaten Tanggamus, (2022), Jembatan Way Sumanda–Sukamulya merupakan jembatan dengan nomor 1802.3.208.001. Jembatan Way Sumanda–Sukamulya melintas di atas Sungai Way Tebu, menghubungkan Desa Sumanda dan Desa Sukamulya Kecamatan Pugung dan sekitarnya. Panjang Jembatan Way Sumanda-Sukamulya adalah 30 meter dan lebar jembatan sebesar 6 meter, dibagi menjadi dua bentang yang ditumpu oleh pilar di tengah bentang (Pemerintah Kabupaten Tanggamus, 2022). Kondisi saat ini, Jembatan Way Sumanda-Sukamulya mengalami gerusan di tebing sungai sekitar abutmen jembatan. Selain itu, pilar jembatan juga mengalami gerusan pada bagian pondasinya. Besi tulangan pada pondasi pilar sudah terlihat menggantung.



(a)

(b)

(c)

Gambar 1 Jembatan Way Sumanda–Sukamulya (a), Gerusan Abutmen (b), Gerusan Pilar (c)

Sumber: Foto dokumentasi, 2023

Menurut Kementerian PUPR RI (1992), salah satu faktor utama yang menyebabkan keruntuhan jembatan adalah gerusan pada dasar sungai, yang diantara penyebabnya adalah adanya gangguan terhadap morfologi dan hidraulika sungai yang berakibat pada terganggunya faktor keseimbangan parameter energi aliran. Proses gerusan pada dasar sungai berlangsung secara terus menerus, sehingga elevasi dasar sungai di hilir semakin berkurang. Apabila dasar sungai turun sampai dasar pondasi jembatan, maka jembatan akan kehilangan pendukungnya dan akhirnya keruntuhan tidak dapat dihindari sehingga dapat mengakibatkan kerugian yang sangat besar.

Berdasarkan pertimbangan hal tersebut maka perlu dilakukan penelitian "Analisis Gerusan Lokal Serta Upaya Pengendaliannya Pada Pilar dan Abutmen Jembatan Way Sumanda–Sukamulya, Kecamatan Pugung, Kabupaten Tanggamus" untuk memprediksi keamanan jembatan terhadap potensi gerusan lokal yang terjadi pada abutmen dan pilar jembatan. Sehingga diharapkan dapat menjadi input bagi pihak-pihak yang berkepentingan dalam meminimalisir dan mengatasi dampak buruk yang mungkin ditimbulkan.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Seberapa besar pengaruh besaran debit aliran terhadap gerusan lokal yang terjadi pada pilar dan abutmen jembatan?
2. Bagaimana memodelkan gerusan lokal pada pilar dan abutmen jembatan dengan software HEC-RAS?
3. Bagaimana pengendalian gerusan pada pilar dan abutmen jembatan dengan struktur bangunan sipil?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian "Analisis Gerusan Lokal Serta Upaya Pengendaliannya Pada Pilar dan Abutment Jembatan Way Sumanda–Sukamulya Kecamatan Pugung, Kabupaten Tanggamus" adalah sebagai berikut:

1. Melakukan simulasi kedalaman gerusan lokal pada pilar dan abutmen Jembatan Way Sumanda–Sukamulya dengan menggunakan software HEC-RAS satu dimensi (HEC-RAS 1D) pada debit banjir kala ulang 2, 5, 10, 25, 50 dan 100 tahun.
2. Menganalisis hubungan besaran debit banjir terhadap kedalaman gerusan lokal yang terjadi pada pilar dan abutmen jembatan.
3. Merekomendasikan alternatif struktur pengendali gerusan lokal pada pilar dan abutmen Jembatan di Way Sumanda–Sukamulya.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui besarnya potensi gerusan lokal pada pilar dan abutmen jembatan serta dampak yang ditimbulkan akibat adanya gerusan tersebut.
2. Mengetahui pengaruh debit aliran terhadap gerusan lokal pada pilar dan abutmen jembatan.
3. Memberi input/masukan bagi pihak terkait tentang alternatif teknologi untuk mengurangi gerusan lokal pada pilar dan abutmen jembatan.

1.5 Batasan Masalah

Penelitian ini dilaksanakan dengan batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini tidak membahas stabilitas jembatan ditinjau dari faktor gaya geser dan gaya guling pada pondasi jembatan.
2. Jenis sedimen yang dikaji dalam penelitian ini hanya sedimen dasar (*bed load*), tidak mengkaji jenis sedimen bilas (*Wash Load*) dan Sedimen melayang (*Suspended Load*)
3. Pemodelan simulasi gerusan lokal pada penelitian ini menggunakan Software *HEC-RAS* satu dimensi (HEC-RAS 1D).
4. Alternatif teknologi untuk mengurangi gerusan lokal pada pilar dan abutmen jembatan pada penelitian ini menggunakan struktur rip rap.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan penelitian ini dilakukan secara sistematis dan akan disajikan dalam lima bab sebagai berikut:

I. PENDAHULUAN

Bab pendahuluan menjelaskan tentang latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan, manfaat penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab tinjauan pustaka berisi tentang tinjauan teori yang menjadi acuan dalam pelaksanaan penelitian dan studi terdahulu yang sejenis.

III. METODE PENELITIAN

Dalam Bab metode penelitian ini berisi tentang uraian langkah-langkah penelitian meliputi pengumpulan data, jenis data yang digunakan dan analisis data yang digunakan dalam penelitian.

IV. PEMBAHASAN

Bab Pembahasan berisi hasil analisis penelitian yang diperoleh. Hasil analisis diantaranya disajikan dalam bentuk grafik, tabel, gambar disertai dengan penjelasan yang mendukung hasil penelitian.

V. SIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini berisi tentang simpulan dan saran berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan. Simpulan yang didapat mengacu pada tujuan penelitian pada bab sebelumnya. Sedangkan saran dimaksudkan untuk memperbaiki penelitian-penelitian lanjutan sehingga didapat hasil yang lebih sempurna dari penelitian sebelumnya.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sungai

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No 38 Tahun 2011 Tentang Sungai, yang dimaksud sungai adalah alur atau wadah air alami dan/atau buatan berupa jaringan pengaliran air beserta air di dalamnya, mulai dari hulu sampai muara, dengan dibatasi kanan dan kiri oleh garis sempadan. Sungai merupakan bagian sumber daya alam yang penting bagi kehidupan manusia, karena menghasilkan air yang dapat memenuhi kebutuhan manusia dalam melangsungkan kehidupan di muka bumi ini. Beberapa manfaat sungai dalam memenuhi kebutuhan manusia diantaranya sebagai sumber air baku, sumber air irigasi, tempat budidaya ikan air tawar, sarana transportasi, sarana olah raga, pariwisata, pertahanan, dan pembangkit tenaga listrik PLTA (Pemerintah RI, 2011).

Sungai terdiri atas palung sungai dan sempadan sungai yang membentuk ruang sungai. Palung sungai sebagai ruang wadah air mengalir juga sebagai tempat berlangsungnya kehidupan ekosistem sungai. Sedangkan sempadan sungai berfungsi sebagai ruang penyangga antara ekosistem sungai dan daratan, agar fungsi sungai dan kegiatan manusia tidak saling terganggu (Pemerintah RI, 2011).

2.1.1. Alur Sungai

Alur sungai terbentuk akibat adanya air hujan yang turun ke permukaan tanah yang kemudian mengalami berbagai perlawanan akibat gaya berat dan pada akhirnya air melimpas ke danau atau laut. Sungai pada bagian hulu umumnya mengalir secara deras karena kemiringan lahan yang sangat terjal. Sedangkan sungai di bagian hilir kemiringan lahannya cukup landai karena sudah memasuki

dataran rendah, kecepatan air menjadi lambat dan sering terjadi endapan sedimen. Hal tersebut menyebabkan sungai menjadi mudah berpindah-pindah arus dan berbelok-belok (G. Ishak & Herman, 2020).

Secara umum alur sungai dibagi menjadi tiga yaitu (Marsudi & Lufira, 2021):

1. Alur sungai bagian hulu

Secara umum alur sungai bagian hulu mengalir melalui pegunungan, perbukitan atau lereng vulkanik. Debit aliran sungai bagian hulu lebih tinggi dari aliran sungai bagian hilir. Pada saat banjir, material yang tergerus tidak hanya berupa partikel pasir halus tetapi terdapat juga material lain seperti pasir kasar, kerikil bahkan bebatuan.

2. Alur sungai bagian tengah

Alur sungai bagian tengah merupakan zona transisi daerah hulu dan hilir. Pada dasar sungai bagian tengah, biasanya memiliki kemiringan yang lebih landai, sehingga kecepatan aliran lebih rendah dari bagian hulu. Daerah alur sungai bagian tengah merupakan wilayah dimana presentase erosi dan pengendapan seimbang.

3. Alur sungai bagian hilir

Daerah hilir sungai biasanya melewati dataran dengan kemiringan dasar sungai landai sehingga alirannya lebih lambat. Endapan sedimen yang terbentuk pada sungai bagian hilir biasanya terdiri pasir halus, lanau, sedimen organik dan jenis sedimen lain yang sangat tidak stabil.

2.1.2. Morfologi Sungai

Morfologi sungai merupakan geometri meliputi bentuk dan ukuran, jenis, sifat dan perilaku sungai dengan segala aspek dan perubahannya dalam dimensi ruang dan waktu (Kurniawan et al., 2017). Menurut Marsudi & Lufira (2021), morfologi sungai meliputi : 1) geometri sungai, 2) hidrolika, 3) geoteknik, 4)

hidrograf, 5) angkutan muatan. Morfologi sungai yang sering digunakan dalam desain bangunan sipil menurut Ishak & Herman (2020) yaitu :

1. Geometri sungai

Geometri sungai berupa topografi, alur, palung sungai dan lembah disekitar sungai. Data yang digunakan dalam analisis geometri sungai meliputi : panjang dan lebar sungai, sudut belokan, kemiringan, elevasi dan azimuth arah arus.

2. Data Hidrograf

Hidrograf diperlukan dalam desain bangunan sungai. Data yang diperlukan antar lain: 1) volume banjir, 2) volume pengaliran, 3) tinggi muka air, 4) kecepatan naik dan turunnya pengaliran, 5) waktu untuk mencapai debit puncak, 6) debit puncak.

3. Hidrolika Sungai

Sistem aliran sungai dapat berupa loncatan, aliran turbulen, laminar juga pusaran. Aliran ini dapat menyebabkan partikel dasar sungai bergerak tergantung dari butiran dan berat jenis sedimen.

Bentuk sungai diantaranya sungai *meander*/berkelok, sungai bercabang, sungai berbentuk lurus (G. Ishak & Herman, 2020).

1. Sungai bercabang (*braided river*)

Sungai bercabang adalah bentuk sungai yang terdiri dari beberapa alur dengan alur satu dan lainnya saling berhubungan. Sungai bercabang pada umumnya memiliki kemiringan dasar sungai relatif besar, beban sedimen dasar lebih besar dibanding sedimen melayang, kandungan lumpur serta lempung relatif kecil.

Sungai bercabang terjadi akibat volume sedimen dasar yang tinggi, sehingga aliran sungai tidak mampu mengangkut sedimen dan terjadi pengendapan. Akibatnya dasar sungai akan naik dan kemiringan dasar sungai bertambah lebih besar. Dengan kemiringan dasar sungai yang bertambah, menyebabkan kecepatan aliran sungai meningkat dan lambat laun dapat membentuk alur sungai bercabang, yang pada akhirnya secara keseluruhan sungai akan menjadi lebih lebar.

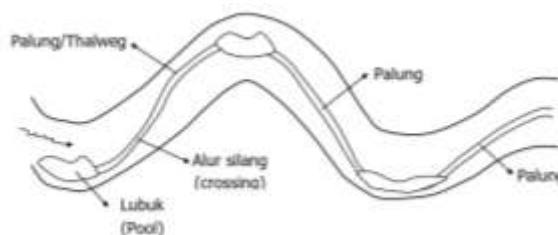
Tebing sungai bercabang relatif mudah tererosi. Hal ini menyebabkan lebar sungai menjadi lebih besar pada saat muka air tinggi. Pada saat muka air surut endapan akan menjadi stabil dan terbentuk pulau-pulau.



Gambar 2. Sungai bercabang (*braided river*)
Sumber:(G. Ishak & Herman, 2020)

2. Sungai bermeander

Sungai bentuk meander yaitu bentuk sungai dengan alur berbelok - belok seperti huruf “S” yang berulang, terjadi akibat erosi tebing sungai dan endapan pada tebing lainnya (G. Ishak & Herman, 2020). Erosi horisontal pada sungai meander lebih besar dari erosi vertikal, sehingga aliran sungai dapat bergeser akibat pengikisan tepi sungai pada belokan bagian luar. Erosi sungai pada sisi bagian luar, jika terjadi secara terus menerus dan dalam waktu yang lama dapat menyebabkan alur sungai semakin berbelok membentuk meander dan dapat menyebabkan alur sungai berpindah (Kurniawan et al., 2017). Komponen meander sungai terdiri : 1) lubuk (“*pool*”), 2) alur silang (*crossing*), 3) *Thalweg* atau palung/alur utama.



Gambar 3. Skema Sungai Meander
Sumber : (G. Ishak & Herman, 2020)

2.2. Aliran Melalui Saluran Terbuka

Chow (1984), menyatakan bahwa yang dimaksud saluran terbuka yaitu saluran yang mengalirkan air dengan suatu permukaan bebas, dapat berupa saluran alam dan saluran buatan. Saluran alam yaitu semua alur air yang berada di bumi yang terbentuk secara alamiah, mulai dari anak selokan kecil di pegunungan, selokan kecil, kali, sungai kecil sampai sungai besar yang bermuara dilaut. Sedangkan saluran buatan yaitu saluran yang dibuat oleh manusia untuk kepentingan tertentu, seperti saluran pelayaran, saluran irigasi, talang air, saluran drainase dan lain-lain.

2.2.1. Klasifikasi Aliran Saluran Terbuka

Aliran pada saluran terbuka dapat di tinjau dari beberapa hal. Berikut merupakan klasifikasi saluran berdasarkan perubahan kedalaman aliran sesuai ruang dan waktu menurut (Chow, 1984):

1. Aliran Tunak (*Steady Flow*)

Aliran dalam saluran terbuka dianggap tunak (*steady*) jika kedalaman aliran tidak berubah atau dapat dianggap konstan selama jangka waktu tertentu.

2. Aliran Tak Tunak (*Unsteady Flow*)

Aliran dianggap tak tunak/tidak tetap (*Unsteady*) apabila kedalaman aliran selalu berubah sesuai dengan waktu.

Menurut Chow (1984), aliran tunak (*Steady Flow*) dan aliran tak Tunak (*Unsteady Flow*) dapat bersifat aliran seragam (*uniform flow*) dan aliran berubah (*varied flow*). Aliran saluran terbuka disebut aliran seragam (*uniform*) bila kedalaman aliran sama sepanjang penampang saluran. Sedangkan aliran disebut berubah (*varied*) jika kedalaman aliran berubah sepanjang saluran. Aliran berubah (*varied*) dapat dibagi menjadi aliran berubah tiba-tiba (*rapidly varied*) dan berubah lambat laun (*gradually varied*). Aliran disebut berubah tiba-tiba bila kedalaman aliran berubah secara mendadak pada jarak yang cukup pendek. Pada aliran tak tunak (*unsteady flow*) jarang sekali terjadi aliran berubah (*varied*).

2. 2.2. Geometri Saluran Terbuka

Penampang saluran alam umumnya tidak beraturan sedangkan penampang saluran buatan menyesuaikan dengan kebutuhan (trapesium, segi empat, segitiga maupun lingkaran). Menurut Kusuma (2012), berdasarkan penampangnya, saluran terdiri dari saluran prismatic dan saluran tak prismatic. Saluran prismatic yaitu saluran yang mempunyai penampang konstan sepanjang saluran. Sedangkan saluran tak prismatic adalah saluran yang mempunyai penampang melintang lebih dari satu di sepanjang saluran.

Saluran terbuka memiliki unsur - unsur geometri diuraikan sebagai berikut (Chow, 1984):

1. Kedalaman aliran (y), yaitu jarak vertikal titik terendah pada suatu penampang saluran sampai ke permukaan bebas.
2. Lebar puncak (T), adalah lebar penampang saluran pada permukaan bebas.
3. Luas basah (A), luas penampang melintang aliran yang tegak lurus dengan arah aliran.
4. Keliling basah (P), panjang garis perpotongan dari permukaan basah saluran dengan bidang penampang melintang yang tegak lurus arah aliran.
5. Jari-jari hidrolis (R), adalah rasio luas basah dengan keliling basah atau secara matematis:

$$R = \frac{A}{P} \dots\dots\dots (1)$$

6. Kedalaman hidrolis (D), adalah rasio luas basah dengan lebar puncak. Secara matematis dirumuskan sebagai berikut:

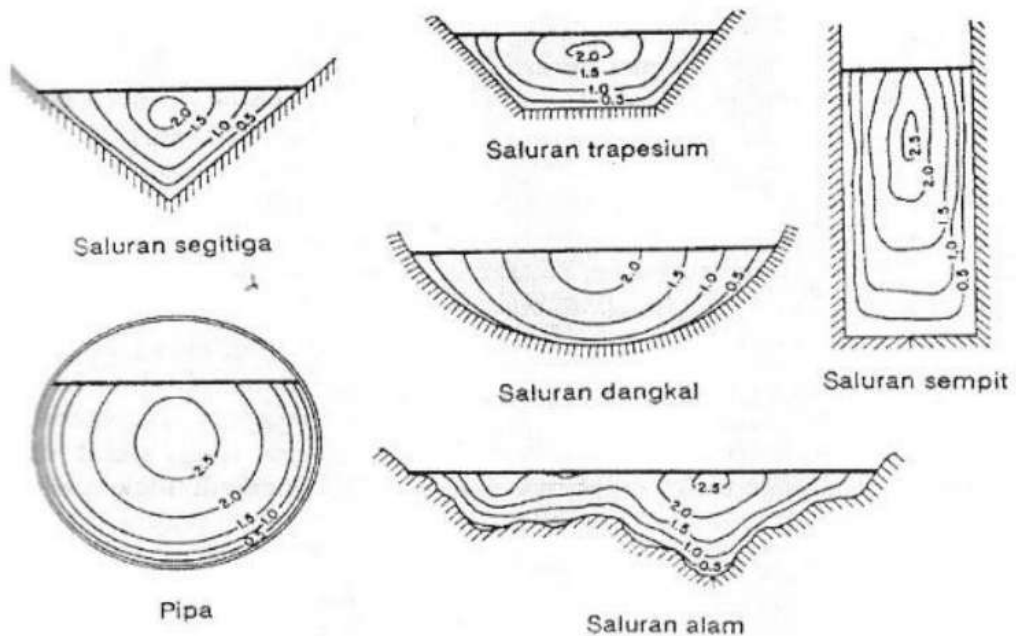
$$D = \frac{A}{T} \dots\dots\dots (2)$$

7. Faktor penampang Z , yaitu hasil perkalian antara luas basah dan akar kedalaman hidrolis. Secara matematis dituliskan sebagai berikut:

$$Z = A \cdot \sqrt{D} = A \cdot \sqrt{\frac{A}{T}} \dots\dots\dots (3)$$

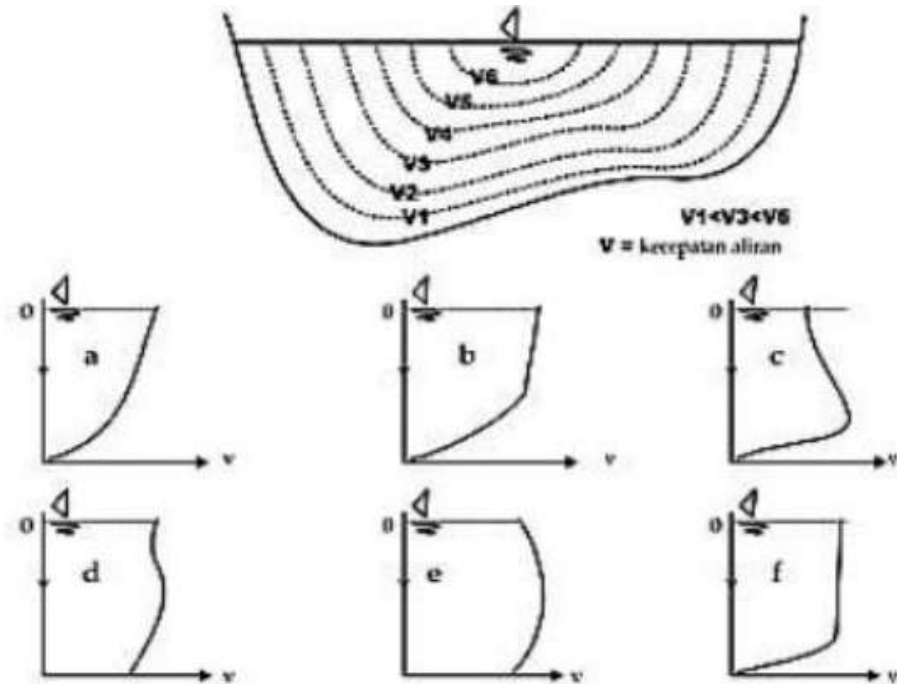
2. 2.3. Distribusi Kecepatan Aliran

Menurut Chow (1984), kecepatan aliran tidak terbagi rata dalam penampang saluran. Kecepatan maksimum biasanya terjadi pada kedalaman 0,05 – 0,25 kali kedalaman. Pola umum distribusi kecepatan untuk berbagai bentuk penampang saluran digambarkan sebagai berikut:



Gambar 4. Kurva kecepatan penampang saluran pada berbagai
Sumber: (Chow, 1984)

Distribusi kecepatan aliran saluran terbuka, dipengaruhi oleh beberapa hal yaitu debit saluran, bentuk saluran, kekasaran dinding dan dasar saluran. Distribusi kecepatan aliran tidak merata pada setiap titik penampang melintang saluran (Imran, 2019). Berikut digambarkan distribusi kecepatan aliran pada penampang melintang berbagai bentuk saluran dalam bentuk garis kontur kecepatan,



- a : distribusi kecepatan secara teoritis
 b : dasar saluran kasar dan banyak tumbuhan
 c : gangguan permukaan (sampah).
 d : aliran cepat, aliran turbulen pada dasar
 e : aliran lambat, dasar saluran halus
 f : dasar saluran kasar/ berbatu

Gambar 5. Distribusi kecepatan pada saluran terbuka
 Sumber: (Imran, 2019)

Pada gambar di atas terlihat bahwa kecepatan minimum pada penampang melintang saluran terjadi pada dekat dinding batas (dasar dan tebing saluran), semakin mendekati permukaan aliran kecepatan semakin besar.

2.3. *Transport Sediment*

Sedimen merupakan butiran tanah yang mengendap yang dihasilkan oleh proses erosi di suatu lokasi yang terangkut ke lokasi lain oleh aliran, angin atau gaya gravitasi. Sedangkan sedimentasi adalah proses mengendapnya material fragmental oleh air sebagai akibat dari adanya erosi (Purwadi et al., 2016). Pengangkutan sedimen (*transport sediment*) dapat digunakan untuk mengetahui apakah suatu sungai akan terjadi penggerusan (*degradasi*) atau pengendapan (*aggradasi*) atau mengalami angkutan sedimen dan untuk memperkirakan kuantitas yang terangkut dalam proses tersebut (Sejati & Kadri, 2021).

Jenis sedimen ditinjau dari mekanisme pengangkutannya terdiri dari tiga yaitu (Sejati & Kadri, 2021):

1. Sedimen Bilas (*Wash Load*)

Sedimen bilas berukuran sangat halus hingga mendekati ukuran koloid dan selalu berada dalam keadaan tersuspensi seperti debu.

2. Sedimen Dasar (*Bed Load*)

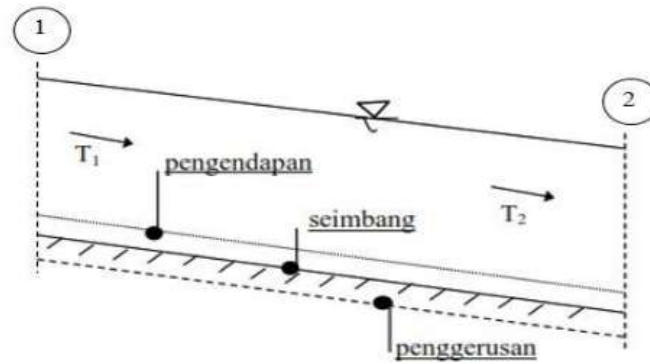
Sedimen berukuran besar bergerak di dasar sungai dengan cara bergeser, menggelinding ataupun meloncat.

3. Sedimen Melayang (*Suspended Load*)

Sedimen yang bergerak dengan melayang di atas dasar, dimana berat partikel dikompensasi oleh turbulensi aliran.

Dalam *transport sediment* apabila debit sedimen sungai yang masuk sama dengan debit sedimen yang keluar sehingga volume sedimen pada penampang sungai tetap maka sungai dalam keadaan seimbang. Keadaan dimana jumlah debit sedimen sungai yang masuk sama dengan debit sedimen yang keluar dalam satu satuan waktu disebut debit sedimen seimbang (Q_{se}). Proses pengendapan (*aggradasi*) di sungai dapat terjadi apabila jumlah sedimen yang masuk (Q_{in}) melebihi kapasitas sedimen seimbang (Q_{se}) dalam satuan waktu tertentu. Sedangkan proses penggerusan (*degradasi*) di sungai dapat terjadi apabila jumlah sedimen yang masuk lebih kecil dari kapasitas sedimen seimbang dalam satuan waktu tertentu (Pratama et al., 2019).

Angkutan sedimen dapat menyebabkan terjadinya perubahan pada dasar sungai. Berikut digambarkan proses angkutan sedimen pada suatu penampang sungai, pada posisi seimbang, mengalami penggerusan (*degradasi*) atau pengendapan (*aggradasi*).



Gambar 6. Skema angkutan sedimen melalui dua tampang sungai
 Sumber : (Pratama et al., 2019)

2. 3.1. Bentuk dan Ukuran Sedimen

Partikel sedimen alam memiliki bentuk yang tidak teratur dan ukuran yang berbeda, pengelompokan butiran didasarkan pada setiap ukuran butiran. Peraturan Geofisika Amerika mengelompokkan ukuran butiran sedimen sebagai berikut dalam Tabel 1.

Skala butiran secara umum dibedakan sebagai berikut (Sejati & Kadri, 2021):

1. Batu (*Boulders*) : 4000 – 250 mm
2. Kerakal (*Cobble*) : 250 – 64 mm
3. Kerikil (*Gravel*) : 64 – 2 mm
4. Pasir (*Sand*) : 2000 – 62 μ
5. Lumpur (*Silt*) : 62 - 4 μ
6. Lempung (*Clay*) : 4 – 0,24 μ

Tabel 1. Klasifikasi butiran menurut AGU (*American Geophysical Union*)

Ukuran Butiran (mm)	Nama	Ukuran Butiran (mm)	Nama
4096 - 2048	batu sangat besar (<i>very large boulders</i>)	1 - 1/2	pasir kasar (<i>coarse sand</i>)
2028 - 1024	batu besar (<i>large boulders</i>)	1/2 - 1/4	pasir sedang (<i>medium sand</i>)
1024 - 512	batu sedang (<i>medium boulders</i>)	1/4 - 1/8	pasir halus (<i>fine sand</i>)
512 - 256	batu kecil (<i>small boulders</i>)	1/8 - 1/16	pasir sangat halus (<i>very fine sand</i>)
256 - 128	kerakal besar (<i>large cobbles</i>)	1/16 - 1/32	lumpur kasar (<i>coarse silt</i>)
128 - 64	kerakal kecil (<i>small cobbles</i>)	1/32 - 1/64	lumpur sedang (<i>medium silt</i>)
64 - 32	kerikil sangat kasar (<i>very coarse gravel</i>)	1/64 - 1/128	lumpur halus (<i>fine silt</i>)
32 - 16	kerikil kasar (<i>coarse gravel</i>)	1/128 - 1/256	lumpur sangat halus (<i>very fine silt</i>)
16 - 8	kerikil sedang (<i>medium gravel</i>)	1/256 - 1/512	lempung kasar (<i>coarse clay</i>)
8 - 4	kerikil halus (<i>fine gravel</i>)	1/512 - 1/1024	lempung sedang (<i>medium clay</i>)
4 - 2	kerikil sangat halus (<i>very fine gravel</i>)	1/1024 - 1/2048	lempung halus (<i>fine clay</i>)
2 - 1	pasir sangat kasar (<i>very coarse sand</i>)	1/2048 - 1/4096	lempung sangat halus (<i>very fine clay</i>)

Sumber : (Lane et al., 1947)

2. 3.2. Awal Gerak Butiran

Pada material sedimen terdapat gaya yang bekerja yang disebabkan oleh adanya aliran air pada permukaannya. Gaya tersebut cenderung menggerakkan atau menyeret butiran sedimen. Kondisi dimana gaya-gaya pada butiran sedimen mencapai titik tertentu yang jika bertambah sedikit saja akan menyebabkan butiran sedimen bergerak, disebut kondisi kritik. Pada kondisi kritik, parameter aliran (seperti tegangan geser dasar " τ_0 " dan kecepatan aliran "U") juga mencapai kondisi kritik (Imran, 2019). Menurut Sejati & Kadri (2021), aliran dapat menggerakkan butiran sedimen pada saat kecepatan rata-ratanya mencapai kondisi kritis yaitu ketika kondisi kritis mencapai suatu nilai sebesar gaya gesek pada dasar saluran. Pada awal gerak butiran gaya yang ditimbulkan oleh aliran air adalah seimbang dengan gaya hambatan dari butiran atau sedimen dasar.

Faktor – faktor yang berkaitan dengan awal gerak butiran sedimen adalah kecepatan aliran, diameter ukuran butiran, gaya angkat yang lebih besar dari gaya berat butiran, dan gaya geser kritis. Tegangan geser aliran (τ_0) merupakan tegangan

yang ditimbulkan akibat adanya gaya pergerakan aliran, yang dinyatakan dengan persamaan (Hermawan & Afianto, 2021):

$$\tau_0 = \rho g h s \dots\dots\dots (4)$$

Dengan :

τ_0 = Tegangan geser dasar (N/m²)

ρ = massa jenis air (kg/m³)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

h = Kedalaman aliran (m)

S = Kemiringan saluran

Awal gerak butiran sedimen dipengaruhi oleh besarnya nilai tegangan geser aliran (τ_0) yang terjadi pada ruas penampang aliran dan tegangan geser kritis (τ_c). Partikel sedimen akan bergerak apabila (Hermawan & Afianto, 2021):

1. $\tau_0 < \tau_c$, maka butiran sedimen dalam kondisi tak bergerak atau diam,
2. $\tau_0 = \tau_c$, maka butiran mulai bergerak,
3. $\tau_0 > \tau_c$, maka butiran sedimen bergerak.

2. 3.3. Analisis Sedimen Dasar

Distribusi butiran sedimen dapat digambarkan dengan kurva distribusi butiran sedimen hasil analisis ayakan (*grain size analysis*). Kurva distribusi butiran sedimen adalah grafik yang menggambarkan hubungan antara ukuran butiran (*grain diameter*) sebagai sumbu X (*absis*) dan persen lolos kumulatif (*percent finer*) sebagai sumbu Y (*ordinat*). Parameter yang dapat digunakan untuk menentukan klasifikasi tanah berbutir kasar yaitu ukuran efektif D_{10} , koefisien keseragamann C_u , dan koefisien gradasi C_c . Ukuran efektif yaitu diameter butiran yang sesuai dengan 10% lolos saringan (D_{10}). Koefisien keseragaman C_u (*coefficient of uniformity*) yaitu perbandingan antara diameter butiran lolos 60 % dan 10 %, yang dinyatakan dengan persamaan (Sofayana, 2020):

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \dots\dots\dots (5)$$

Dengan,

C_u : *coefficient of uniformity*

d_{60} : diameter butiran lolos saringan 60% (mm)

d_{10} : diameter butiran lolos saringan 10% (mm)

Sedangkan koefisien gradasi C_c (*coefficient of gradation*) yaitu Perbandingan antara kuadrat dari diameter butiran lolos saringan 30% dan hasil perkalian antara diameter butiran lolos saringan 10% dan 60%. Secara matematis koefisien gradasi C_c dinyatakan dengan persamaan:

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{(d_{10})(d_{60})} \dots\dots\dots (6)$$

dengan:

C_c : *coefficient of gradation*

D_{60} : diameter butiran lolos saringan 60% (mm)

D_{10} : diameter butiran lolos saringan 10% (mm)

D_{30} : diameter butiran lolos saringan 30% (mm)

Berdasarkan nilai koefisien keseragaman C_u dan koefisien gradasi C_c komposisi butiran dibedakan atas sedimen bergradasi baik dan bergradasi buruk. Untuk kerikil, sedimen dikategorikan bergradasi baik/seragam jika $C_u > 4$, dan $1 < C_c < 3$. Sedangkan pasir, sedimen bergradasi baik/seragam jika $C_u > 6$ dan $1 < C_c < 3$, Jika tidak memenuhi ketentuan maka material dikategorikan bergradasi buruk (Sofayana, 2020).

2.4. Gerusan (*Scouring*)

Gerusan adalah fenomena alam yang disebabkan oleh proses erosi dari aliran air pada dasar atau tepi saluran aluvial (Raudkivi & Ettema, 1983). Gerusan dapat terjadi karena perbuatan manusia dan juga peristiwa alam. Gerusan yang terjadi akibat perbuatan manusia diantaranya kegiatan eksploitasi sedimen baik legal maupun ilegal, operasi bendungan, dan semua kegiatan pembangunan struktur yang ditempatkan pada aliran sungai (Pizarro et al., 2020). Sedangkan proses alam

di sungai yang dapat memicu terjadinya gerusan misalnya meandering, belokan, pertemuan sungai dan aliran *inlet* pasang surut (Inamdeen et al., 2021).

Jenis gerusan dibagi menjadi tiga yaitu (Breusers & Raudkivi, 1991):

- a. Gerusan umum (*general scour*), gerusan yang terjadi secara alami pada sungai atau saluran, tidak berkaitan dengan ada tidaknya struktur bangunan sungai.
- b. Gerusan dilokalisir/penyempitan (*contriction scour*), gerusan yang terjadi akibat penyempitan aliran sungai sehingga aliran menjadi terpusat.
- c. Gerusan lokal (*local scour*), gerusan yang terjadi karena adanya bangunan air yang menyebabkan pola aliran lokal di sekitar bangunan sungai.

Berdasarkan perbedaan kondisi angkutan, gerusan dibagi menjadi dua yaitu (Imran, 2019), (Saputro et al., 2021):

- a. Kondisi *clear water scour*

Gerusan air jernih (*clear water scour*) terjadi ketika material dasar di bagian hulu daerah gerusan dalam keadaan diam. Pada gerusan air jernih, kedalaman gerusan maksimum tercapai ketika aliran tidak dapat lagi memindahkan partikel dari lubang gerusan (Raudkivi & Ettema, 1983). Pada kondisi *clear water scour*, proses gerusan dan sedimentasi dipengaruhi oleh kecepatan rata-rata (U) dan Kecepatan aliran kritis (U_{cr}). Proses gerusan dan sedimentasi tidak terjadi jika $\frac{U}{U_{cr}} \leq 0,5$. Jika $0,5 \leq \frac{U}{U_{cr}} \leq 1,0$ maka proses gerusan terjadi secara terus menerus tetapi proses transportasi sedimen tidak terjadi (Suma et al., 2018).

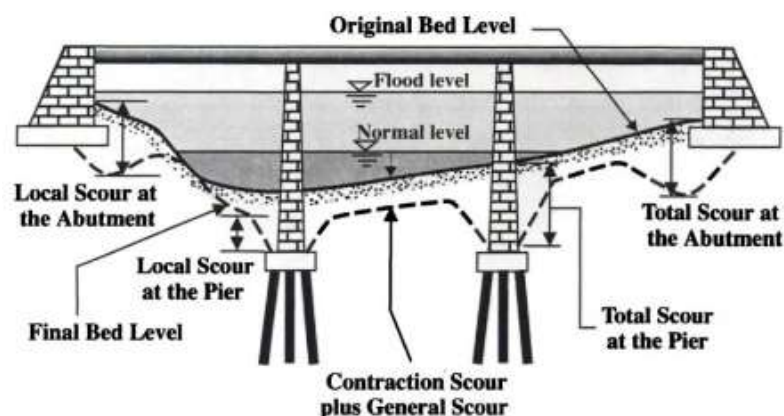
- b. Kondisi *live bed scour*

live bed scour disebut juga sebagai gerusan dengan angkutan sedimen, terjadi ketika ada angkutan muatan dasar oleh aliran. Kondisi *live bed scour* juga dipengaruhi oleh kecepatan rata-rata (U) dan Kecepatan aliran kritis (U_{cr}), terjadi jika $\frac{U}{U_{cr}} \geq 1,0$ (Suma et al., 2018).

2.4.1 Gerusan pada Jembatan

Gerusan pada jembatan merupakan gerusan lokal yang terjadi karena adanya degradasi (penurunan) dasar sungai di sekitar jembatan. Gerusan pada jembatan umumnya terdiri dari tiga yaitu: gerusan umum (*general scour*), gerusan kontraksi (*contraction scour*) dan gerusan lokal (*local scour*). Gerusan umum (*general scour*) yaitu gerusan yang terjadi pada umumnya di sungai, terjadi secara alami pada sungai yang dilintasi oleh jembatan tanpa terpengaruh oleh adanya struktur jembatan. Gerusan kontraksi (*Contraction scour*) adalah gerusan yang terjadi akibat penyempitan saluran oleh struktur jembatan. Sedangkan gerusan lokal (*local scour*) yaitu gerusan yang terjadi karena adanya bangunan air dalam hal ini abutment dan pilar jembatan (Rauf et al., 2023).

Menurut B. W. Melville & Coleman (2000) gerusan lokal yang terjadi disekitar jembatan disebabkan oleh sistem pusaran air (*vortex system*) karena adanya gangguan pola aliran akibat rintangan. Sedangkan gerusan terlokalisir terjadi karena adanya penyempitan penampang sungai oleh adanya penempatan bangunan hidraulika. Gerusan umum yang terjadi melintang sungai di sepanjang saluran yang menyebabkan degradasi dasar sungai disebabkan oleh energi dari aliran air (Raudkivi & Ettema, 1983).



Gambar 7. Tipe gerusan yang dapat terjadi di jembatan
Sumber : (B. W. Melville & Coleman, 2000)

Inamdeen et al. (2021) lebih spesifik mengklasifikasikan gerusan pada jembatan menjadi tiga yaitu: gerusan kontraksi (*contraction scour*), gerusan pilar

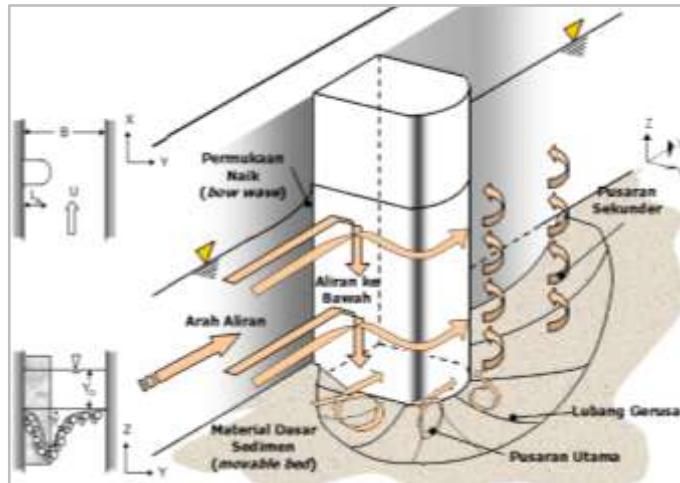
(*pier scour*) dan gerusan abutmen (*abutment scour*). Berikut penjelasan masing-masing gerusan pada jembatan.

2.4.1.1. Gerusan Kontraksi (*Contraction scour*)

Kontruksi jembatan yang dibangun melintang sungai secara otomatis akan mengurangi luas penampang sungai (penyempitan) dengan adanya struktur bawah jembatan berupa pilar dan atau abutmen jembatan. Pada kondisi debit aliran yang konstan maka penyempitan sungai menyebabkan meningkatnya kecepatan aliran dan tegangan geser pada saluran. Kecepatan dan tegangan geser yang meningkat berpotensi dapat mengikis material dasar dan tepian sungai sehingga menyebabkan menurunnya elevasi dasar saluran yang disebut gerusan kontraksi (*Contraction scour*) (Inamdeen et al., 2021).

2.4.1.2. Gerusan Abutmen (*Abutment Scour*)

Abutmen jembatan adalah bagian konstruksi struktur bawah jembatan yang terdapat pada kedua ujung jembatan, berfungsi memikul beban di atasnya untuk diteruskan ke pondasi dan tanah di bawahnya (Apriliani et al., 2020). Abutmen jembatan sebagai struktur bawah, dapat menghalangi aliran air di sungai yang berasal dari hulu jembatan. Akibat terhalangnya aliran tersebut maka arah aliran akan berubah dari horizontal menuju hilir, menjadi vertikal menuju dasar saluran, lalu sebagian berbelok arah menuju depan abutmen dan selanjutnya diteruskan ke arah hilir. Aliran arah vertikal akan terus menuju dasar saluran yang selanjutnya membentuk sistem pusaran (*vortex system*). Kemudian di lokasi dekat dasar saluran komponen aliran berbalik arah vertikal ke atas, yang diikuti dengan terbawanya material dasar sehingga terbentuk aliran spiral yang menyebabkan gerusan dasar. Hal ini akan terus berlanjut hingga tercapai keseimbangan (Halim, 2014). Lebih jelasnya, mekanisme terjadinya gerusan abutmen digambarkan sebagai berikut:



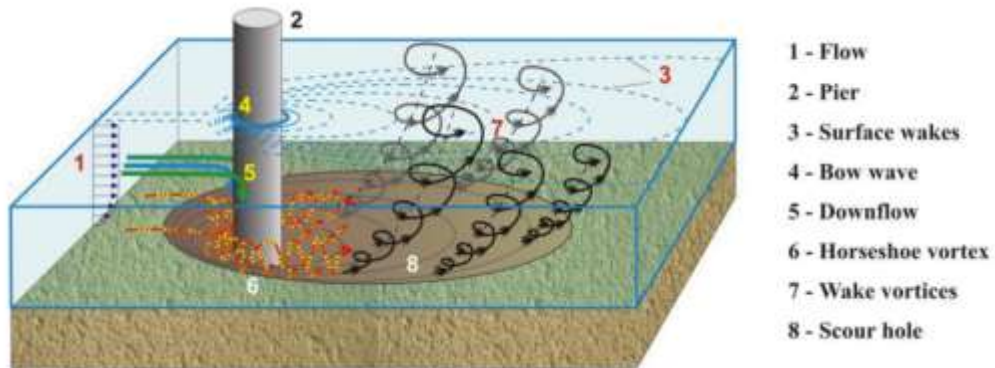
Gambar 8. Mekanisme gerusan abutmen
 Sumber: (Husnan & Yulistiyanto, 2007)

2.4.1.3. Gerusan Pilar (*Pier Scour*)

Sama halnya dengan abutmen, pilar jembatan merupakan konstruksi jembatan pada bagian bawah yang berfungsi menopang beban di atasnya dan menuruskan ke pondasi dan tanah. Pilar jembatan terletak di tengah bentang antara dua buah abutmen (Apriliani et al., 2020). Struktur pilar jembatan yang berada di tengah bentang akan menghalangi aliran air dari hulu jembatan, sehingga aliran membentuk aliran vertikal ke arah dasar yang selanjutnya menyebabkan terkikisnya dasar sungai di sekitar pilar. Gerusan lokal terjadi akibat adanya sistem pusaran (*vortex system*) yang timbul akibat terhalangnya aliran oleh pilar jembatan (Rauf et al., 2023).

Inamdeen et al. (2021) menyebutkan bahwa gerusan pada pilar jembatan terjadi karena pengikisan material dari dasar sungai di sekitar pilar yang disebabkan oleh percepatan aliran dan pembentukan pusaran (*vortex*) yang kompleks. Pilar jembatan menghalangi aliran dan merubah pola aliran sungai sehingga menghasilkan sistem pusaran yang kompleks (*vortex*) di sekitar pilar, yang terdiri dari aliran bawah (*down flow*) dan pusaran permukaan (*surface roller vortices*) di hulu pilar. Selain itu juga terbentuk pusaran tapal kuda (*horseshoe vortices*) di dekat sisi hulu dasar pilar, serta pusaran lepas (*wake vortices*) di daerah hilir pilar. Ketika

aliran ke bawah (*down-flow*) mengenai dasar sungai, material dasar menjadi longgar, dan pusaran tapal kuda (*horseshoe vortices*) serta pusaran lepas (*wake vortices*) membawa material dasar yang terlepas menjauh dari pilar bersama aliran utama (*main flow*).



Gambar 9. Mekanisme pembentukan gerusan lokal pada pilar jembatan
Sumber: (Herman & Zukaenah, 2024)

2.4.2 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Gerusan Lokal

Menurut B. Melville (2002), faktor-faktor yang mempengaruhi kedalaman gerusan lokal pada pilar dan abutmen jembatan adalah sebagai berikut:

- 1) **Pendekatan aliran**, terdiri dari kecepatan rata-rata (V), kedalaman (y) dan koefisien *Manning* (n) saluran utama. Untuk tiang jembatan, nilai V dan y yang tepat adalah yang paling mewakili aliran yang mendekati tiang tertentu.
- 2) **Sedimen dasar**, terdiri dari ukuran median (d_{50}), ukuran maksimum (d_{max}) dan Standar deviasi geometri (σ_g) dari distribusi ukuran partikel butiran. Dalam praktiknya, d_{90} (atau ukuran serupa) dapat digunakan sebagai pengganti d_{max} , yang kemungkinan besar tidak diketahui.
- 3) **Geometri pondasi pilar/abutmen**, terdiri lebar tiang (b) dan panjang pilar (l) untuk pilar, panjang abutmen (L) untuk abutmen, bentuk pilar/abutmen (Sh) dan sudut pilar (Θ). Untuk pilar melingkar kedalaman gerusan dipengaruhi oleh diameter pilar (D). Untuk pilar yang tidak seragam, diperlukan parameter tambahan selain hal tersebut.

- 4) **Geometri saluran (hanya untuk abutmen)**, terdiri kecepatan (v^*), kedalaman (y^*), koefisien *Manning* (n^*) dan lebar (L^*) saluran.

Menurut Baranwal & Das (2024), Faktor yang mempengaruhi kedalaman gerusan di sekitar pilar jembatan adalah sebagai berikut :

1. Lebar pilar (b), lebar pilar mempengaruhi kedalaman gerusan, karena pilar yang lebih lebar menyebabkan lebih banyak terjadi turbulensi dan lubang gerusan lebih dalam;
2. Kedalaman aliran (y), kedalaman aliran air mempengaruhi kedalaman gerusan, karena aliran yang lebih dalam umumnya akan menciptakan lubang gerusan yang lebih dalam;
3. Kecepatan aliran (V), kecepatan aliran air juga mempengaruhi kedalaman gerusan, karena kecepatan yang lebih tinggi akan menyebabkan lubang gerusan yang lebih dalam;
4. Ukuran sedimen dasar (d_{50}), ukuran sedimen di dasar sungai mempengaruhi kedalaman gerusan, karena gradasi butiran mempengaruhi parameter kekasaran dasar sungai;
5. Bilangan Froude (Fr), bilangan Froude merupakan sebuah nilai tanpa dimensi yang mempengaruhi kedalaman gerusan. Bilangan Froude yang lebih tinggi mengindikasikan lubang gerusan yang lebih kuat (Jika $Fr \leq 1$, maka aliran subkritis dan $Fr > 1$ aliran dikategorikan aliran superkritis);
6. Faktor koreksi dermaga (K), berbagai faktor koreksi pilar digunakan untuk memperhitungkan dampak geometri pilar dan kondisi aliran tertentu terhadap kedalaman gerusan. Faktor koreksi ini dapat bervariasi tergantung pada persamaan empiris spesifik yang digunakan.

2.4.3 Estimasi Kedalaman Gerusan Lokal

2.4.3.1. Estimasi Kedalaman Gerusan Lokal Pilar Jembatan

Kedalaman gerusan lokal pada pilar jembatan dapat dihitung dengan beberapa persamaan diantaranya: a) *Colorado State University* (CSU), b) Froehlich, c) Metode Lauren dan Toch

a. Persamaan Gerusan Pilar *Colorado State University* (CSU)

Secara empiris persamaan *Colorado State University* (CSU) menghitung prediksi gerusan lokal pada pilar jembatan sebagai berikut:

$$d_s = 2,0 y K_1 K_2 K_3 K_4 Fr^{0,43} (b/y)^{0,65} \dots\dots\dots (7)$$

Dimana :

- d_s : Kedalaman gerusan (m)
- b : Lebar pilar (m)
- y : Kedalaman aliran (m)
- Fr : Bilangan Froude
- K_1 : Koefisien bentuk pilar
- K_2 : Koefisien sudut aliran
- K_3 : Koefisien kondisi dasar saluran
- K_4 : nilai koreksi untuk efek gradasi sedimen

Koefisien K_1 , K_2 dan K_3 disajikan dalam tabel-tabel berikut:

Tabel 2. Faktor koreksi bentuk pilar K_1

Bentuk dari Ujung Pilar	K_1
Persegi	1,1
Lingkar	1,0
Silinder Lingkar	1,0
Kumpulan Silinder	1,0
Segitiga	0,9

Sumber : (Wabia et al., 2022)

Tabel 3. Faktor koreksi koefisien sudut aliran K_2

Sudut Aliran	$l/b = 4$	$l/b = 8$	$l/b = 12$
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	3,9	3,9	5,0

Sumber : (Setiati et al., 2019)

Tabel 4. Faktor koreksi kondisi dasar saluran K_3

Kondisi Saluran	Ukuran (m)	K_3
<i>Clear Water Scour</i>	n.a	1,1
<i>Pane bed/anti dunes</i>	n.a	1,1
<i>Small dunes</i>	0,6 – 3,0	1,1
<i>Medium dunes</i>	3,0 – 9,1	1,1 – 1,2
<i>Large dunes</i>	> 9,1	1,3

Sumber : (Wabia et al., 2022)

b. Metode Gerusan Pilar *Froehlich*

Persamaan *Froehlich* hanya dapat diterapkan ketika pada pilar tunggal (Pradana et al., 2022). Persamaan kedalaman gerusan Metode *Froehlich* sebagai berikut (Mousavi & Daneshfaraz, 2013) :

$$d_s = 0,32 K (b')^{0,62} y^{0,46} Fr^{0,22} (d_{50})^{-0,09} + b \dots\dots\dots (8)$$

Dengan :

d_s : Kedalaman gerusan (m)

K : 1,3 (Pilar persegi); K : 1,0 (Pilar Lingkaran); K : 0,7 (Pilar Segitiga)

b : Lebar pilar (m)

$b' = b \cos \beta + L \sin \beta$

L = Panjang pilar

β = Arah sudut aliran terhadap pilar

y : Kedalaman aliran (m)
 Fr : Bilangan Froude
 d50: ukuran butiran (m)

c. Metode Gerusan Pilar *Laursen dan Toch* (1956)

Persamaan gerusan pilar *Laursen dan Toch* (1956) dihitung dengan persamaan berikut (Suma et al., 2018) :

$$d_s = 1,35 b^{0,7} y^{0,3} \dots\dots\dots (9)$$

dengan,

d_s : kedalaman gerusan (m)
 b : lebar pilar (m)
 y : kedalaman aliran (m)

2.4.3. 2. Estimasi Kedalaman Gerusan Lokal Abutmen Jembatan

Abutmen merupakan salah satu struktur bagian bawah. Estimasi kedalaman gerusan lokal abutmen dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

a. Persamaan Gerusan Abutmen Froehlich

Persamaan Froehlich digunakan pada abutmen dengan perbandingan $L/y < 25$, Dimana L adalah panjang abutmen dan y adalah kedalaman aliran (Shaskia & Rizalihadi, 2019). Berikut Persamaan Froehlich untuk memperkirakan kedalaman gerusan pada abutmen jembatan (Shaskia & Rizalihadi, 2019):

$$\frac{Y_s}{Y_a} = 2,27 K_1 K_2 \left[\frac{L'}{Y_a} \right]^{0,43} F_{r1}^{0,61} + 1 \dots\dots\dots (10)$$

Dengan

Y_s : kedalaman gerusan (m);
 Y_a : kedalaman rerata aliran pada dataran banjir (m);
 K_1 : koefisien akibat bentuk abutmen;

- K_2 : koefisien akibat sudut peletakan abutmen terhadap arah aliran;
- L' : panjang abutmen yang menghalangi aliran (m);
- F_{r1} : bilangan Froude aliran di hulu abutmen.

b. Persamaan Gerusan Abutmen HIRE

Persamaan HIRE digunakan pada abutmen dengan perbandingan $L/y > 25$, Dimana L adalah panjang abutmen dan y adalah kedalaman aliran (Shaskia & Rizalihadi, 2019). Persamaan HIRE secara matematis dituliskan sebagai berikut (Shaskia & Rizalihadi, 2019):

$$\frac{Y_s}{Y_1} = 4F_{r1}^{0,33} \left[\frac{K_1}{0,55} \right] K_2 \dots\dots\dots (11)$$

Dengan,

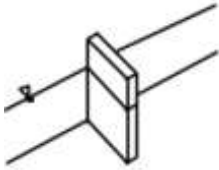
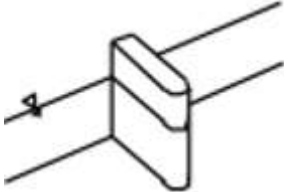

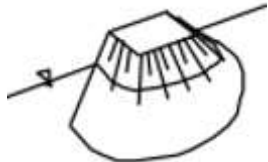
- Y_s : kedalaman gerusan (m);
- Y_1 : kedalaman aliran pada saluran utama (m);
- K_1 : koefisien akibat bentuk abutmen;
- K_2 : koefisien akibat sudut peletakan abutmen terhadap arah aliran;
- F_{r1} : bilangan Froude aliran di hulu abutmen.

Nilai K_1 ditentukan berdasarkan tipe abutmen seperti terlihat pada Tabel 5, sedangkan nilai K_2 dihitung sesuai persamaan berikut:

$$K_2 = \left(\frac{\theta}{90} \right)^{0,13} \dots\dots\dots (12)$$

- $\theta < 90$ jika abutmen mengarah ke hilir; dan
- $\theta > 90$ jika abutmen mengarah ke hulu.

Tabel 5. Nilai K1

Model Abutmen	Bentuk Abutmen	Koefisien
	<i>Vertical Wall</i>	1
	<i>Semicircular Ended</i>	0,75
	<i>45° wing wall</i>	0,75
	<i>Spill through with slope</i>	
	<i>Horizontal : vertical</i>	
	0,5 : 1	0,6
	1 : 1	0,5
	1,5 : 1	0,45

Sumber : (Shaskia & Rizalihadi, 2019)

c. Persamaan Gerusan Abutmen Shen I dan Shen II

Persamaan Shen I dan Shen II disajikan sebagai berikut (Purwantoro, 2015):

Persamaan Shen I :

$$Y_s = 1,17 \cdot U_0^{0,62} \cdot b^{0,62} \cdot K_3 \dots\dots\dots (13)$$

Persamaan Shen II

$$Y_s = 1,59 \cdot U_0^{0,67} \cdot b^{0,67} \cdot K_3 \dots\dots\dots (14)$$

Y_s : Kedalaman gerusan, diukur (arah vertikal) dari dasar sampai elevasi muka pasir dekat sebelah hulu abutmen, (m)

b : Lebar abutmen, m

U_0 : Kecepatan aliran, m/det

K_3 : faktor pengali abutmen.

untuk model abutmen jenis *spill trough* yaitu $K_3 = 0,5$

d. Persamaan Gerusan Abutmen Neill (1964)

Persamaan Neill (1964) untuk menghitung kedalaman gerusan pada abutmen jembatan dalam adalah sebagai berikut (Purwantoro, 2015):

$$\frac{Y_s}{Y_0} = 1,5 \left[\frac{b}{Y_0} \right]^{0,7} \dots\dots\dots (15)$$

Dengan,

Y_s : Kedalaman gerusan, cm

Y_0 : Kedalaman aliran seragam, m

b : Lebar abutmen, m

2.5. Analisis Hidrologi

Menurut Triadmodjo (2008), Hidrologi adalah ilmu yang berkaitan dengan air di bumi, baik mengenai terjadinya, peredaran dan penyebarannya, sifat-sifatnya, dan hubungan dengan lingkungannya terutama dengan makhluk hidup. Dalam perencanaan dan perancangan bangunan air (seperti perencanaan jembatan, bendung, saluran drainase dan bendungan), analisis hidrologi digunakan untuk memperkirakan besarnya debit banjir rencana, yaitu debit banjir yang dipakai sebagai dasar untuk perhitungan perencanaan bangunan air (Subarkah, 1980). Sedangkan dalam perencanaan penyediaan air seperti penyediaan air minum, air irigas, air kebutuhan industri dan PLTA, analisis hidrologi digunakan untuk memperkirakan debit andalan yaitu besarnya debit perencanaan yang diharapkan selalu tersedia untuk mencukupi kebutuhan air dengan risiko kegagalan yang telah diperhitungkan (Soemarto, 1986).

Analisis hidrologi dapat menggunakan data hidrologi berupa debit sungai yang berasal dari stasiun PDA (Pos Duga Air) atau data hujan dari stasiun hujan terdekat. Namun biasanya, stasiun PDA yang tersedia tidak banyak seperti pos hujan. Sehingga pada beberapa situasi, data hujan masih diperlukan untuk analisis hidrologi.

2.5.1. Curah Hujan Kawasan (*Areal Rainfall*)

Data hujan pada pos hujan yang tersedia berupa data *point rainfall* atau hujan titik, yaitu hujan yang terjadi hanya pada satu lokasi saja. *Point rainfall* tidak menggambarkan hujan yang terjadi di area yang lebih luas, sehingga untuk mengetahui besaran hujan yang mewakili suatu kawasan perlu analisis curah hujan kawasan. Hujan kawasan diperoleh dari nilai curah hujan rata-rata beberapa stasiun hujan yang terletak di dalam dan atau di sekitar area tersebut (Suripin, 2003). Secara umum curah hujan kawasan dapat dihitung dengan tiga cara yaitu metode aritmatik, poligon Thiessen dan Isohyet (Triadmodjo, 2008).

2.5.1.1. Metode Rerata Aritmatik (Aljabar)

Persamaan curah hujan kawasan metode Aritmatik adalah sebagai berikut (Wattimury et al., 2023):

$$\bar{P} = \frac{P_1+P_2+P_3+\dots+P_n}{n} \dots\dots\dots(16)$$

Dengan,

- \bar{P} : curah hujan rata-rata kawasan(mm)
- $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$: Curah hujan pada stasiun 1,2,3 ..., n (mm)
- n : Banyaknya stasiun hujan

2.5.1.2. Metode *Polygon Thiessen*

Metode *Polygon Thiessen* juga disebut sebagai *weighted mean* atau metode rata-rata timbang. Cara ini memberikan proposi ketidakseragaman jarak. Daerah pengaruh dibentuk dengan garis-garis sumbu tegak lurus terhadap garis yang

menghubungkan dua pos penakar terdekat. Curah hujan kawasan metode *Polygon Thiessen* dihitung dengan persamaan berikut (Amanda et al., 2023):

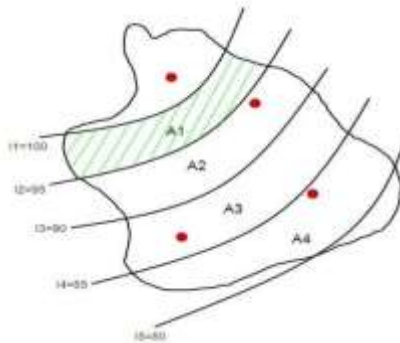
$$\bar{P} = \frac{P_1.A_1+P_2.A_2+P_3.A_3+\dots+P_n.A_n}{A_1+A_2+A_3+\dots+A_n} \dots\dots\dots (17)$$

Dengan,

- \bar{P} : Curah hujan rata-rata kawasan (mm)
- $P_1, P_2, P_3, \dots P_n$: Curah hujan pada stasiun ke 1,2,3, n (mm)
- $A_1, A_2, A_3, \dots A_n$: Luas Area poligon stasiun ke 1,2,3, n (mm)
- n : Banyaknya pos stasiun hujan

2.5.1.3. Metode Isohyet

Menurut Soemarto (1986), metode isohyet adalah metode yang paling teliti untuk menghitung curah hujan rata-rata kawasan, namun membutuhkan jaringan pos penakar hujan yang lebih banyak untuk membuat garis-garis isohyet.



Gambar 10 Poligon Isohyet

Rata-rata curah hujan kawasan metode isohyet dapat dihitung dengan persamaan:

$$\bar{P} = \frac{A_1(\frac{P_1+P_2}{2})+A_2(\frac{P_2+P_3}{2})+A_n(\frac{P_n+P_n}{2})}{A_1+A_2+A_3+\dots+A_n} \dots\dots\dots (18)$$

Dengan,

- \bar{P} : Curah hujan rata-rata (mm)
- $P_1, P_2, P_3, \dots P_n$: Curah hujan pada stasiun ke 1,2,3, n (mm)

$A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$: Luas Area poligon pada stasiun ke 1,2,3 ..., n (mm)
 n : Banyaknya stasiun hujan

2.5.2. Curah Hujan Rencana

Curah hujan rencana adalah curah hujan maksimum yang mungkin terjadi pada periode ulang tertentu. Periode ulang didefinisikan sebagai waktu hipotetik suatu kejadian hujan/debit dengan besaran tertentu akan disamai atau terlampaui sekali dalam jangka waktu tersebut (Triadmodjo, 2008). Curah hujan rencana ini yang kemudian akan dialihragamkan menjadi debit rencana yang akan digunakan dalam perencanaan. Curah hujan rencana dapat dihitung dengan analisis frekuensi data hidrologi.

2.5.3. Analisis Frekuensi

Menurut Triadmodjo (2008) Analisis frekuensi data/ hidrologi bertujuan untuk mencari hubungan antara besarnya kejadian ekstrim terhadap frekuensi kejadian dengan menggunakan distribusi probabilitas. Menurut Suripin, (2003) analisis frekuensi didasarkan pada sifat statistik data kejadian yang telah lalu untuk memperoleh probabilitas besaran hujan di masa yang akan datang.

2.5.3.1. Parameter Statistik

Beberapa parameter statistik yang berkaitan dengan analisis data dijabarkan sebagai berikut:

a. Nilai Rata-Rata (\bar{X})

Nilai rata-rata dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$\bar{X} = \frac{1}{n}(X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n) \dots\dots\dots (19)$$

Dengan,

n : banyak data

$X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$: Data ke 1,2,3, ..., n

b. Simpangan Baku/Stadar Deviasi (S)

Simpangan Baku/ Standar Deviasi dihitung dengan persamaan:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (X - \bar{X})^2} \dots\dots\dots (20)$$

c. Koefisien Variasi (Cv)

Koefisien Variasi (Cv) dihitung dengan persamaan matematis berikut:

$$Cv = \frac{S}{\bar{X}} \dots\dots\dots (21)$$

d. Koefisien Skewnes (Cs)

Koefisien Skewness atau Koefisien kemencengan dapat dihitung dengan persamaan matematis berikut:

$$Cs = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{(n-1)(n-2)S^3} \dots\dots\dots (22)$$

e. Koefisien Kurtosis (Ck)

Koefisien Kurtosis (Ck) dinyatakan dengan persamaan matematis berikut:

$$Ck = \frac{n(n+1)}{(n-1)(n-2)(n-3)S^4} \sum (X - Xi)^4 - \frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)} \dots\dots\dots (23)$$

2.5.3.2. Distribusi Probabilitas

Distribusi probabilitas yang sering digunakan dalam analisis frekuensi untuk hidrologi diantaranya distribusi normal, log normal, gumbel, dan log pearson III. Penentuan jenis distribusi dilakukan dengan menyocokkan parameter statistik dan syarat jenis distribusi masing-masing, yang disajikan dalam Tabel 6 berikut:

Tabel 6. Karakteristik distribusi frekuensi

NO	Distribusi Frekuensi	Syarat Distribusi	
		Koefisien Skeweness (Cs)	Koefisien Kurtosis (Ck)
1	Normal	Cs = 0	Ck = 3
2	Log Normal	Cs = 3 Cv + Cv ³	Ck = Cv ⁸ + 6Cv ⁶ + 15Cv ⁴ + 16Cv ² + 3
3	Gumbel	Cs=1,1396	Ck=5,4002
4	Log Pearson III	Selain nilai di atas	Selain nilai di atas

Sumber: (Triadmodjo, 2008)

d. Distribusi Normal

Menurut Suripin (2003), distribusi normal disebut juga distribusi gauss. Persamaan matematis perhitungan curah hujan rancangan dengan distribusi normal adalah sebagai berikut (Suripin, 2003):

$$X_t = \bar{X} + K_t.S \dots\dots\dots (24)$$

Dengan,

- X_t : Curah hujan periode ulang (mm)
- \bar{X} : Curah hujan maksimum rata-rata (mm)
- K_t : Faktor frekuensi gauss
- S : Simpangan Baku

e. Distribusi Log Normal

Distribusi Log Normal digunakan apabila nilai-nilai dari variabel random tidak mengikuti distribusi normal, tetapi nilai logaritmanya memenuhi distribusi normal (Triadmodjo, 2008). Berikut persamaan matematis distribusi log normal:

$$\text{Log } X_t = \text{Log } \bar{X} + K_t.S \dots\dots\dots (25)$$

f. Distribusi Gumbel

Distribusi Gumbel banyak digunakan untuk Analisa data maksimum seperti analisis frekuensi banjir. Analisis frekuensi metode Gumbel sebagai berikut (Suripin, 2003):

$$X = \bar{X} + K.S \dots\dots\dots (26)$$

dimana,

- X : Curah hujan periode ulang (mm)
- \bar{X} : Curah hujan maksimum rata-rata (mm)
- S : Standar deviasi
- K : faktor frekuensi Gumbel, dihitung dengan persamaan:

$$K = \frac{Y_t - Y_n}{S_n} \dots\dots\dots (27)$$

Y_T : *Reduced mean* atau nilai reduksi data dari variabel yang diharapkan terjadi pada periode ulang tertentu

$$Y_t = -L_n \left\{ -L_n \left[\frac{T_r(x) - 1}{T_r(x)} \right] \right\} \dots\dots\dots (28)$$

- Y_n : Nilai rata-rata dari reduksi data, nilainya tergantung dari jumlah data (n)
- S_n : *Reduced Standar Deviation* yang nilainya tergantung dari jumlah data (n)

g. Distribusi Log Pearson III

Persamaan distribusi Log Pearson Tipe III disajikan sebagai berikut (Suripin, 2003) :

$$\text{Log } X_t = \overline{\text{Log } X} + G.S \dots\dots\dots (29)$$

dengan,

- X_t : *Besarnya* curah hujan dengan periode t (mm)
- $\overline{\text{Log } X}$: *Rata-rata* nilai logaritma data X hasil pengamatan (mm)
- S : Standar Deviasi nilai logaritma data X hasil pengamatan
- K : Nilai koefisien untuk Distribusi Log Pearson Type III yang tergantung dengan nilai koefisien kemencengan Cs

2.5.4. Uji Kesesuaian Distribusi

Untuk menguji kesesuaian terhadap analisis distribusi frekuensi yang telah dilakukan maka perlu dilakukan uji kesesuaian distribusi. Metode yang sering digunakan untuk melakukan uji kesesuaian distribusi yaitu uji *Chi-Kuadrat* dan *Smirnov Kolmogorov*.

2.5.4.1. Uji Chi Kuadrat

Uji Chi Kuadrat dapat dihitung menggunakan rumus berikut (Suripin, 2003):

$$X^2h = \sum_{t=1}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \dots\dots\dots (30)$$

Dengan,

- X^2h : Nilai Chi-Kuadrat hitung
- N : jumlah satu sub kelompok
- O_i : Jumlah nilai pengamatan pada sub kelompok i
- E_i : Jumlah nilai teoritis pada sub kelompok i, $E_i = n/K$

Jumlah kelas distribusi dan batas kelas dihitung dengan rumus :

$$K = 1 + 3,332 \text{ Log } n \dots\dots\dots (31)$$

Dimana, K adalah Jumlah kelas distribusi dan n adalah Banyaknya data.

Besarnya nilai derajat kebebasan, dk dihitung dengan rumus:

$$dk = K - (R - 1) \dots\dots\dots (32)$$

Dengan : dk : derajat kebebasan.

K : banyaknya kelas

R : 2, untuk distribusi normal dan binomial

Menurut Triadmodjo (2008), banyaknya kelas distribusi K, diupayakan tidak kurang dari 5. Hasil perhitungan nilai X^2h harus lebih kecil dari nilai X^2cr (Chi Kuadrat Kritik) yang diperoleh dari tabel Chi Kuadrat.

2.5.4.2. Smirnov Kolmogorov

Prosedur pengujian menggunakan uji Smirnov Kolmogorov sebagai berikut (Suripin, 2003):

- a. Mengurutkan data (dari besar ke kecil atau sebaliknya)
- b. Menentukan besarnya peluang teritis dari masing-masing data tersebut

$$P(x) = m/(n+1) \dots\dots\dots (33)$$

dengan, m adalah urutan data data ke m, sedangkan n adalah banyaknya data

- c. Menentukan besarnya peluang empiris dari masing-masing data tersebut

$$P'(x) = m/(n-1) \dots\dots\dots (34)$$

- d. Menghitung nilai maksimum D_{max}

$$D_{max} = P < X - P < X'$$

$$P < X = 1 - P (X)$$

$$P < X' = 1 - P (X')$$

- e. Membandingkan nilai D_{max} dan D_{cr} yang dilihat dalam tabel.

2.5.5. Debit Banjir Rencana

Debit banjir rencana yaitu debit banjir kala ulang tertentu yang digunakan sebagai dasar dalam perencanaan bangunan air, sehingga perencanaan bangunan diharapkan terjaga keamanannya dari bahaya banjir yang mungkin ditimbulkan (Subarkah, 1980). Menurut Suripin (2003), secara umum metoda untuk menghitung debit banjir rencana ada dua yaitu metode rasional dan metode hidrograf banjir.

a. Metode Rasional

Penggunaan metode rasioanal cocok pada DAS yang berukuran kecil yaitu kurang dari 300 Ha. Persamaan matemastisnya adalah sebagai berikut (Suripin, 2003):

$$Q = 0,2778 \times C \times I \times A \dots\dots\dots (35)$$

dengan :

- Q : Debit rancangan (m³/detik)
- C : Koefisien aliran
- I : Intensitas hujan (mm/jam)
- A : Luas DAS (Km²)

Intensitas hujan dihitung menggunakan rumus Mononobe :

$$I = \frac{R_{24}}{24} \times \left(\frac{24}{t_c}\right)^{2/3} \dots\dots\dots (36)$$

dengan :

- R₂₄ : Hujan maksimum harian rata-rata (mm)
- T_c : Waktu konsentrasi (jam)

Waktu konsentrasi dihitung menggunakan rumus yang dikembangkan oleh Kirpich (1940), sebagai berikut :

$$t_c = 0.0133L \times i^{-0,6} \dots\dots\dots (37)$$

dengan :

- t_c : Waktu konsentrasi (jam)
- L : Panjang sungai (Km)
- i : Kemiringan sungai

b. Metode Hidrograf Satuan Sintentis (HSS) Nakayasu

Hidrograf adalah kurva yang menggambarkan hubungan antara parameter aliran dan waktu. Parameter aliran tersebut dapat berupa elevasi muka air atau debit. Selanjutnya dalam penelitian ini yang dimaksud hidrograf adalah hidrograf debit. Hidrograf satuan adalah hidrograf limpasan langsung yang disebabkan oleh hujan efektif yang terjadi merata seluruh DAS dan dengan intensitas tetap selama satu satuan waktu yang ditetapkan. Sedangkan hidrograf satuan sintentis adalah hidrograf satuan yang diturunkan berdasarkan data-data dari sungai pada DAS yang sama atau DAS terdekat yang mempunyai karakteristik yang sama (Suripin, 2003).

Salah satu metode perhitungan debit banjir rencana dengan menggunakan metode hidrograf satuan sintentis (HSS) yaitu metode HSS Nakayasu. HSS Nakayasu dikembangkan berdasarkan beberapa sungai yang terdapat di Jepang (Soemarto, 1987). Metode HSS Nakayasu merupakan metode untuk menghitung analisis debit banjir rancangan yang sering digunakan di Indonesia (Amanda et al., 2023). Persamaan Hidrograf Satuan Sintetik Nakayasu adalah sebagai berikut (Paramudinta et al., 2021):

$$Q_p = \frac{A \cdot R_e}{3,6 (0,3t_p + T_{0,3})} \dots\dots\dots (38)$$

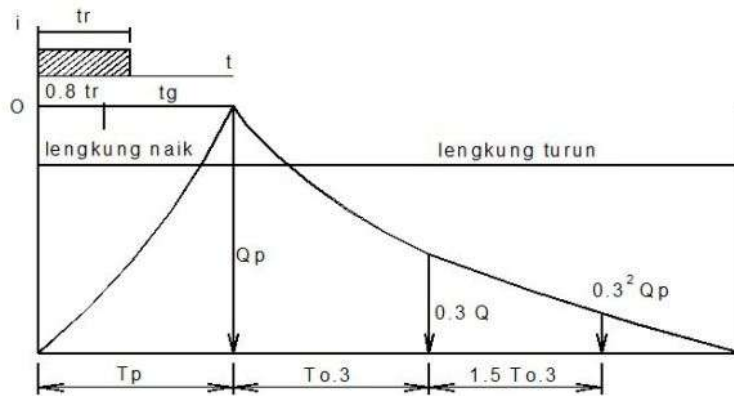
dengan :

Q_p : Debit puncak banjir (M3/detik)

R_e : Hujan efektif satuan (mm)

t_p : Tenggang waktu (*time lag*) dari permulaan hujan sampai puncak banjir (jam)

$T_{0,3}$: Waktu yang diperlukan oleh penurunan debit, dari debit puncak sampai menjadi 30% dari debit puncak (jam)



Gambar 11 Hidrograf Satuan Sintetik Nakayasu

Untuk menentukan T_p dan $T_{0,3}$ digunakan pendekatan rumus sebagai berikut :

$$T_p = t_g + 0,8 tr \dots\dots\dots (39)$$

$$T_{0,3} = \alpha t_g \dots\dots\dots (40)$$

$$T_r = 0,5t_g \text{ sampai } t_g$$

tg adalah time lag yaitu waktu antara hujan sampai debit puncak banjir (jam).
tg dihitung dengan ketentuan sebagai berikut :

Sungai dengan panjang alur $L > 15$ km

$$tg = 0,4 + 0,058 L \dots\dots\dots (41)$$

Sungai dengan panjang alur $L < 15$ km

$$tg = 0,21 L^{0,7} \dots\dots\dots (42)$$

Dengan :

t_r : Satuan Waktu hujan (jam)

α : Parameter hidrograf, untuk :

$\alpha : 2 \Rightarrow$ Pada daerah pengaliran biasa

$\alpha : 1,5 \Rightarrow$ Pada bagian naik hidrograf lambat, dan turun cepat

$\alpha : 3 \Rightarrow$ Pada bagian naik hidrograf cepat, turun lambat

2.6. Struktur Pengendali Gerusan

Prinsip kerja struktur pengendali gerusan dalam mengendalikan gerusan diantaranya meningkatkan kemampuan tegangan geser dasar saluran untuk menahan aliran, mengurangi tekanan aliran bawah dan pusaran tapal kuda, menahan pusaran agar tidak mencapai dasar saluran dengan melindungi dasar saluran dengan permukaan kaku yang tidak dapat ditembus, dan memodifikasi pusaran tapal kuda agar tidak menyebabkan gerusan (Singh et al., 2020). Beberapa bangunan pengendali gerusan di abutmen dan pilar jembatan yaitu riprap, bronjong, groin dan grounsil.

2.6.1. Rip-rap

Rip-rap adalah kumpulan bongkahan batu alami atau blok beton buatan dengan ukuran dan volume tertentu yang dapat berfungsi mengurangi kedalaman gerusan lokal dan juga melindungi tebing sungai di sekitar jembatan (Dirjen Bina Marga, 2021). Setiati & Kurniawati (2021), menyebutkan bahwa salah satu metode yang digunakan untuk mencegah gerusan adalah riprap, yaitu dengan meletakkan batuan di sekitar pilar atau di dalam lubang gerusan sekitar pilar jembatan. Rohmah

et al. (2022), juga menyebutkan bahwa berdasarkan hasil simulasi menggunakan SSIIM-2 (*Sediment Simulation in Intakes with Multiblock Option*), penggunaan batuan riprap dapat mereduksi kedalaman gerusan pada abutment jembatan. Batuan riprap menahan gerusan melalui kombinasi ukuran dan berat batu, daya tahan batu, dan gradasi dan ketebalan selimut riprap. Proses saling mengunci dari batu-batu riprap bersudut memberikan ketahanan terhadap gerakan untuk masing-masing blok di dalam *revetment* (British Columbia Water Management Branch Public Safety Section, 2000).

Jika ketersediaan material batu tidak mencukupi maka dapat digunakan alternatif material rip rap dari beton yang berbentuk gelagar ukuran 1 m x 1 m x 2m atau bentuk kubus ukuran 1 m x 1 m x 1 m (Dirjen Bina Marga, 2021). Menurut Zulfan (2017), alternatif pengendali gerusan dengan riprap batu lebih direkomendasikan dengan pertimbangan bahwa riprap batu lebih ekonomis, mudah diaplikasikan, dan ketersediaan material mudah didapatkan di lapangan.

Dimensi partikel rip rap pada pilar jembatan ditentukan dengan rumus (Setiati & Kurniawati, 2021):

$$D_{50} = \frac{0.692(V_{des})^2}{(\gamma_g - 1)2g} \dots\dots\dots (43)$$

Dengan,

- D_{50} : diameter butiran lolos saringan 50 % (m)
- V_{des} : kecepatan desain untuk kondisi lokal pada pilar (m/s)
- γ_g : berat jenis rip-rap (biasanya diambil 2,65)
- g : percepatan gravitasi (9,81 m/s²).

Sedangkan dimensi batuan rip-rap pada abutmen jembatan dihitung berdasarkan nilai bilangan froude (Fr), sebagai berikut:

- a. Untuk bilangan Froude $\frac{V}{\sqrt{gh}} < 0.80$ Persamaan desain dimensi riprap adalah (Uwais.A, 2018)

$$\frac{D_{50}}{h} = \frac{K}{(\gamma_g - 1)} \left[\frac{V}{g \cdot h} \right]^2 \dots\dots\dots (44)$$

Dengan,

D_{50} : diameter butiran lolos saringan 50 % (m)

V : kecepatan karakteristik rata-rata dalam bagian yang menyempit (m/s)

γ_g : berat jenis rip-rap (biasanya diambil 2,65)

g : percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

h : Kedalaman aliran pada bagian yang menyempit di bawah jembatan

K : 0,89 untuk abutmen miring

1,02 untuk abutmen dinding vertikal

- b. Untuk bilangan Froude $\frac{V}{\sqrt{gh}} > 0.80$, persamaan desain untuk menentukan dimensi riprap adalah sebagai berikut (Dirjen Prasarana Wilayah Kementrian PUPR RI, 2004):

$$\frac{D_{50}}{h} = \frac{K}{(\gamma_g - 1)} \left[\frac{V^2}{g \cdot h} \right]^{0,14} \dots\dots\dots (45)$$

Dengan,

K : 0,61 untuk abutmen miring

0,69 untuk abutmen dinding vertikal

Apabila material di bawah lapisan riprap mempunyai gradasi yang memungkinkan butir halus terbawa keluar melalui rongga-rongga antara riprap maka diperlukan lapisan penyaring (*filter*) di bawah riprap yang dapat terbuat dari kerikil atau *geotextile*. Untuk filter kerikil, ketebalan lapisan disarankan setengah dari tebal riprap. Gradasi filter kerikil harus memenuhi kriteria persamaan berikut (Herbudiman et al., 2011):

$$\frac{D_{50}(\text{filter})}{D_{50}(\text{base})} < 40 \dots\dots\dots (46)$$

$$5 < \frac{D_{15}(\text{filter})}{D_{15}(\text{base})} < 40 \dots\dots\dots (47)$$

$$\frac{D_{15}(\text{filter})}{D_{85}(\text{base})} < 5 \dots\dots\dots (48)$$

2.6.2. Bronjong (Gabion)

Bronjong atau *gabion* adalah keranjang kawat yang diisi dengan batu - batu berbagai ukuran (Craswell & Akib, 2020). Menurut Dirjen Prasarana Wilayah Kementrian PUPR RI (2004), bronjong merupakan salah satu cara untuk mengantisipasi gerusan yang paling banyak dan sering digunakan. Hal ini dilakukan karena pemasangannya relatif mudah dan dengan biaya ringan.

Menurut Craswell & Akib (2020) bahwa bronjong kawat dapat memberikan kinerja yang lebih baik dalam mengurangi gerusan dari pada riprap dengan ukuran yang sama, atau ukuran bronjong yang setara dapat menghasilkan solusi yang lebih hemat biaya untuk mengurangi gerusan. Disisi lain bronjong berisiko mengalami kegagalan dalam beberapa hal. Bronjong dapat terlepas dari pilar jembatan jika terkena gerusan tepi yang berlebihan, yang menyebabkan kegagalan bronjong. Kawat yang digunakan pada bronjong adalah yang paling mungkin mengalami kegagalan, kawat tersebut dapat rusak akibat korosi (jika air mengandung kontaminan), abrasi akibat akumulasi puing-puing, atau jika terjadi penurunan yang berlebihan. Hal tersebut dapat menyebabkan kegagalan kawat pada saat kawat mengalami perubahan bentuk (Craswell & Akib, 2020).

2.6.3. Groundsill (Ambang Dasar Sungai)

Groundsill merupakan salah satu bangunan air yang dibangun untuk mengendalikan dasar sungai agar tidak terjadi penurunan yang berlebihan dengan membuat dasar sungai tetap stabil dan tidak rusak (Raissa et al., 2023). Hal ini sejalan dengan yang dikemukakan oleh Ragilia & Susarman (2021), bahwa bangunan *groundsill* dapat mengurangi masalah gerusan di dasar sungai, sehingga struktur *groundsill* dapat mengendalikan penurunan dasar sungai.

Groundsill yang dibangun di hilir jembatan dimaksudkan agar sedimen hasil gerusan lokal pada jembatan yang terbawa oleh aliran air dapat tertahan, sehingga material dasar di sekitar jembatan tidak mengalami penurunan signifikan yang dapat menyebabkan ketidakstabilan konstruksi jembatan (Pangestu & Astuti, 2018).

Pangestu & Astuti (2018), dalam penelitiannya menyebutkan bahwa *groundsill* dibagi menjadi dua tipe, yaitu:

1. *Groundsill* tipe ambang datar (*bed gindle work*)

Groundsill ambang datar berfungsi menjaga permukaan dasar sungai agar tidak mengalami penurunan lagi. Elevasi mercu *groundsill* ambang datar hampir sama dengan permukaan dasar sungai (tidak memiliki terjunan).

2. *Groundsill* tipe ambang pelimpah (*head work*)

Groundsill ambang pelimpah berfungsi untuk membuat kemiringan dasar sungai lebih landai sehingga kecepatan dasar sungai berkurang dan material hasil gerusan lokal pada jembatan dapat tertahan pada hulu *groundsill*. *Groundsill* ambang pelimpah biasanya didesain dengan terjunan, sehingga elevasi dasar sungai bagian hulu memiliki lebih tinggi dari bagian hilirnya.

2.6.4. Krib/Groyn

Krib merupakan struktur pelindung tebing yang digunakan untuk melindungi tebing sungai dari gerusan lokal yang disebabkan oleh arus aliran sungai yang tinggi (Zulfan & Yiniarti, 2018). Pemasangan krib efektif untuk mengurangi kedalaman gerusan di tebing sungai, pola aliran menjadi tersebar tidak terkonsentrasi di satu tempat. sehingga tebing sungai menjadi lebih aman, kedalaman gerusan pada dasar sungai menjadi berkurang.

Jarak antara krib yang dipasang untuk membelokan/ menarik aliran dalam suatu kelompok adalah sebagai berikut (Herbudiman et al., 2011):

$$L_s = \frac{C_y^{1,33}}{2.g.n^2} < 5 \dots\dots\dots (49)$$

Dengan,

L_s = jarak antara krib (m)

C = konstanta (berkisar = 0.6)

y = kedalaman rata-rata aliran (m)

n = koefisien Manning

g = percepatan gravitasi (m^2/det)

Krib yang dipasang sepanjang tebing sungai yang lurus jarak antar krib dihitung dengan rumus sebagai berikut (Herbudiman et al., 2011):

$$LS = 4,0Ps \text{ s.d } 4,5Ps \dots\dots\dots (50)$$

$$LS = 1,0B \text{ s.d } 2,0B \dots\dots\dots (51)$$

Dengan,

Ps = panjang krib (m), diukur tegak lurus dari tebing sungai

B = lebar rerata saluran (m)

2.7. Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu tentang gerusan lokal di jembatan telah banyak dilaksanakan oleh para peneliti, baik penelitian gerusan lokal pada abutmen jembatan maupun pilar jembatan, peneliti dari dalam negeri maupun peneliti dari luar negeri. Beberapa penelitian selama lima tahun terakhir disajikan dalam Tabel 7. Penelitian ini merupakan pengembangan penelitian Wattimury et al. (2023). Sama halnya dengan Wattimury et al. (2023), bahwa penelitian ini untuk mengetahui besarnya gerusan pada jembatan dengan menggunakan *Software* HEC-RAS. Pengembangannya adalah bahwa pada penelitian ini analisis gerusan dilakukan tidak hanya pada pilar jembatan, tetapi juga dilakukan pada abutmen jembatan. Analisis gerusan juga dilakukan pada debit berbagai kala ulang sehingga dapat diketahui hubungan debit banjir dengan kedalaman gerusan lokal pada jembatan. Alternatif teknologi struktur pengendalian gerusan pada penelitian ini dikembangkan dengan struktur rip-rap, sedangkan pada penelitian Wattimury et al. (2023) menggunakan Blok Beton ACBs.

Tabel 7. Penelitian sejenis dalam lima tahun terakhir

NO	Judul Penelitian	Peneliti	Metode Penelitian	Kesimpulan
1	Pengaruh Pilar Segitiga dan Pilar Setengah Lingkaran Terhadap Kedalaman Gerusan	(Herman & Zukaenah, 2024)	Penelitian dilakukan di Laboratorium dengan Flume beton berukuran 15 m x 0,9 m x 0,9 m. Menggunakan pilar berbentuk segitiga dan setengah lingkaran dengan ukuran pilar panjang 50 cm, lebar 10 cm dan tinggi 50 cm. Sedimen yang digunakan adalah pasir lolos saringan No. 10 dan tertahan saringan No. 20 dengan nilai d_{50} sebesar 0,62 mm; masing-masing percobaan dilakukan selama 120 menit	Besarnya gerusan berbanding terbalik dengan ketinggian muka air. Semakin kecil ketinggian muka air maka semakin besar kedalaman gerusan yang terjadi dan sebaliknya. Hal itu dipengaruhi oleh kecepatan alirannya karena semakin besar kedalaman aliran (ketinggian muka air) yang terjadi maka kecepatan alirannya semakin lambat sehingga semakin kecil gerusan yang terjadi disekitar pilar.
2	Eksperimen Laboratorium Pengaruh Hidung Pilar Jembatan Terhadap Kedalaman Gerusan Lokal Setimbang	(Rauf et al., 2023)	Penelitian dilakukan dengan eksperimen laboratorium menggunakan perangkat saluran terbuka (<i>set circulating flume</i>) panjang 740 cm, lebar 28 cm, dan tinggi 40 cm, untuk mengetahui pengaruh hidung (<i>nose</i>) pilar terhadap kedalaman gerusan lokal setimbang yang terjadi. Asumsi aliran yang digunakan adalah aliran tetap (<i>steady flow</i>) dengan debit sebesar 0,0252 m ³ /det, radius pilar yang digunakan yaitu 1 cm; 1,5 cm; dan 2 cm. Pengukuran kedalaman gerusan dilakukan dengan interval waktu 30 menit hingga kedalaman scouring setimbang tercapai.	Radius pilar mempengaruhi kedalaman dan waktu gerusan lokal kondisi setimbang. Semakin kecil <i>nose</i> pilar maka semakin kecil pula scouring yang terjadi, serta nose pilar juga mampu mereduksi waktu terjadinya <i>scouring</i> setimbang.
3	Evaluasi Gerusan Di Jembatan Waikaka Menggunakan Software Hec-Ras 5.0.7	Wattimury et al. (2023)	Penelitian ini menghitung kedalaman gerusan Jembatan Waikaka dengan software HEC-RAS 5.0.7 serta solusi penanganan gerusan. Data yang digunakan terdiri dari kedalaman sungai, kecepatan, dimensi jembatan dan sample sedimen yang diambil langsung di lapangan. Ukuran	Debit kala ulang 25 tahun menghasilkan gerusan pada pilar 1 sebesar 3,19 meter dan pilar 2 sebesar 3,09 meter. Rekomendasi solusi untuk melindungi pilar jembatan dari bahaya

NO	Judul Penelitian	Peneliti	Metode Penelitian	Kesimpulan
			butiran didapat dari uji laboratorium. Debit banjir rencana didapat dari analisis hidrologi sedangkan analisis hidrolika menggunakan software Hec-Ras 5.0.7 pada debit banjir 25 tahun.	gerusan yaitu menggunakan sistem blok beton ACBs
4	Analisis Gerusan Lokal Menggunakan Metode Empiris Pada Pilar Jembatan Kuala Samboja Kabupaten Kutai Kartanegara	Pradana et al. (2022)	Metode penelitian meliputi, analisa hujan rencana dan hidrograf banjir, pengukuran batimetri, kecepatan aliran dan pembuatan rating curve, pengambilan sampel sedimen serta analisa butiran sedimen di laboratorium. Perhitungan kedalaman gerusan menggunakan metode empiris HEC-18, Froehlich, Laursen & Toch dan Salim & Jone. Bentuk pilar yang dianalisis adalah pilar kumpulan silinder dengan jarak antar pilar 1,2 m dengan diameter 0,5 m. Debit yang digunakan adalah debit dominan (Qdominan) sebesar 377.944 m ³ /detik	Kedalaman gerusan lokal menggunakan beberapa metode empiris memiliki hasil yang berbeda antara satu sama lain. Perbedaan hasil perhitungan antar metode terjadi karena tiap metode memiliki parameter yang berbeda dalam menentukan kedalaman gerusan sehingga memberikan hasil kedalaman yang berbeda
5	Analisis Gerusan di Sekitar Pilar Jembatan Sungai Pappa' Akibat Perubahan Kecepatan Aliran	Kasmawati et al. (2021)	Analisis gerusan menggunakan metode empiris yaitu metode Laursen dan Touch, dan Colorado State University (CSU). Bentuk pilar yang dianalisis adalah pilar lenticular atau pilar kapsul dengan lebar pilar 1 m dengan menggunakan data kecepatan dan kedalaman aliran yang diukur langsung di lapangan.	Kecepatan aliran berbanding lurus dengan kedalaman gerusan, Semakin besar nilai kecepatan aliran maka gerusan lokal yang terjadi juga akan semakin besar dan sebaliknya. Karakteristik aliran atau bilangan Froude (Fr) sangat berpengaruh terhadap gerusan di sekitar pilar jembatan
6	<i>Scouring around bridge pier: A comprehensive analysis of scour depth predictive equations for clear-water and live-bed scouring conditions</i>	Baranwal & Das (2024)	Mengumpulkan dan membandingkan (1) data eksperimental dan lapangan yang tersedia tentang berbagai jenis gerusan pilar jembatan, (2) pengaruh parameter aliran dan kekasaran pada <i>Clear Water Scouting</i> (CWS) dan <i>Live – Bed Scouring</i> (LBS), dan (3) persamaan empiris yang	Penerapan semua model prediksi kedalaman gerusan yang tersedia untuk memperkirakan gerusan di sekitar tiang jembatan tidak tepat untuk skenario lapangan, jika kondisi gerusan air jernih (<i>Clear Water Scouting</i>) atau gerusan dasar hidup (<i>Live – Bed Scouring</i>) ada di

NO	Judul Penelitian	Peneliti	Metode Penelitian	Kesimpulan
	(Gerusan di Sekitar Pilar Jembatan: Analisis Komprehensif Tentang Persamaan Prediksi Kedalaman Gerusan Kondisi Gerusan Air Jernih dan gerusan dengan angkutan sedimen)		ada yang cocok untuk menghitung kedalaman gerusan keseimbangan di sekitar pilar jembatan dalam kondisi CWS dan LBS. Penelitian yang disajikan terdiri	sekitar tiang jembatan, disarankan untuk lebih memilih persamaan gerusan air jernih atau persamaan gerusan dasar hidup, sesuai kondisi masing-masing. Alasan utama kolapsnya jembatan secara global disebabkan oleh gerusan tiang jembatan. Perubahan iklim terkait dan pemanasan global dapat memperburuk gerusan jembatan, terutama karena meningkatnya banjir sungai. Para peneliti disarankan untuk mempertimbangkan berbagai aliran, kekasaran, dan bentuk non-sirkular, yaitu, persegi, persegi panjang, elips, dan miring. Selain itu, kajian dampak perubahan iklim terkait dengan pemanasan global sangat penting untuk memajukan studi tentang kondisi banjir sungai.
7	<i>Scouring around different shapes of bridge pier</i> (Gerusan di sekitar berbagai bentuk pilar jembatan)	(Huda et al., 2023)	Tujuan penelitian ini adalah pemodelan fisik gerusan lokal untuk pilar dengan bentuk yang umum dijumpai (melingkar, berhidung bundar, dan elips) dan untuk mengembangkan hubungan gerusan lokal dan gerusan umum. Penelitian dilakukan di laboratorium dengan dilakukan di flume miring dengan panjang 21,5 m, tinggi 0,6 m, dan lebar 1 m, menggunakan kemiringan 1:114, yang merupakan kondisi umum di lembah. Variasi debit air diatur dengan katup pengatur pada inflow flume.	Kedalaman erosi lokal bervariasi tergantung pada bentuk pilar, dengan pilar melingkar menunjukkan kedalaman erosi terbesar, sedangkan pilar ujung bulat menunjukkan kedalaman terendah
8	<i>Risk-informed asset management to tackle scouring on bridges across</i>	Sasidharan et al. (2022)	Menetapkan dasar bagi pendekatan berbasis risiko dalam menangani erosi jembatan, sambil mempertimbangkan dampak sosial-ekonomi dari	Pemilik aset jembatan harus didorong untuk: (i) mengidentifikasi jembatan yang kemungkinan rentan terhadap penggerusan, (ii) mengevaluasi

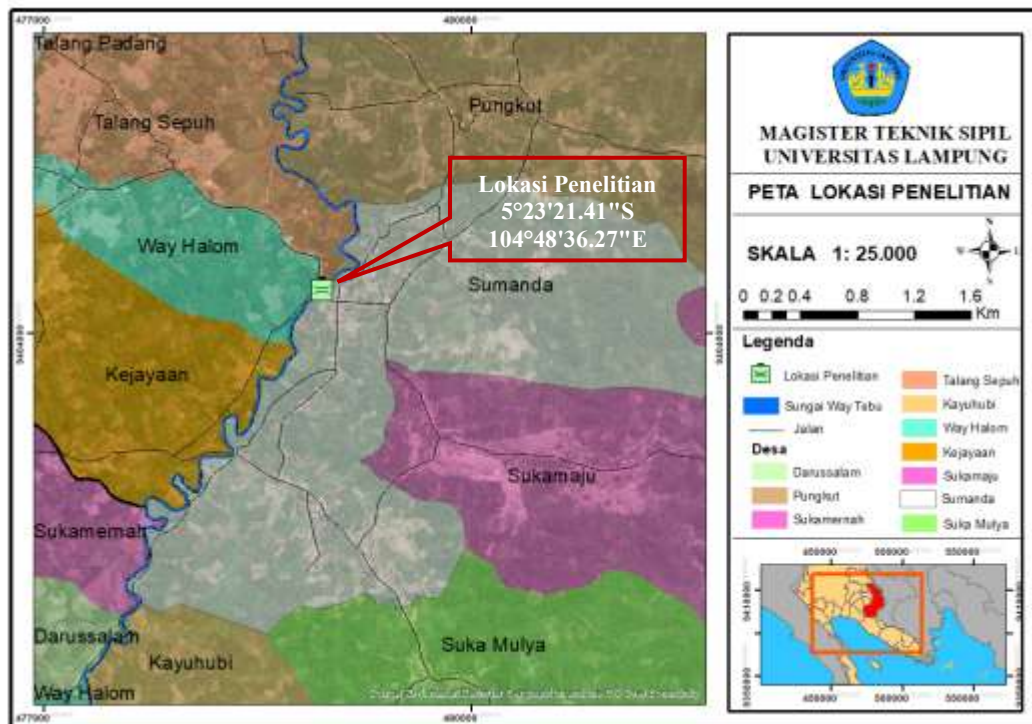
NO	Judul Penelitian	Peneliti	Metode Penelitian	Kesimpulan
	<i>transport networks</i> (Manajemen aset berbasis risiko untuk mengatasi gerusan pada jembatan di seluruh jaringan transportasi)		gangguan akibat kegagalan atau penutupan jembatan. meninjau praktik saat ini dalam memprediksi, memantau, dan mengelola gerusan jembatan. Ini membahas pengembangan pendekatan berbasis risiko untuk membantu penilaian seumur hidup jembatan sambil mempertimbangkan biaya langsung dan tidak langsung yang terkait dengan kegagalan atau penutupan jembatan. Pendekatan ini memberikan cara yang rasional untuk memungkinkan manajer aset mengevaluasi faktor-faktor yang memengaruhi risiko kegagalan jembatan, memilih dan memprioritaskan langkah-langkah mitigasi yang tepat, sehingga meningkatkan alokasi sumber daya pemantauan dan pemeliharaan yang terbatas.	karakteristik fisik infrastruktur jembatan untuk memahami paparan terhadap perubahan iklim atau peristiwa ekstrem, dan (iii) mempertimbangkan dampak makroekonomi yang terkait dengan penutupan atau kegagalan jembatan saat menyusun anggaran untuk strategi pemantauan dan pemeliharaan
9	<i>Local Scour in Rivers Due To Bridges and Natural Features. a Case Study From Rönne River, Sweden</i> (Gerusan Lokal di Sungai Akibat Jembatan dan Fitur Alami. Studi Kasus Dari Sungai Rönne, Swedia)	Inamdeen et al. (2021)	Meninjau berbagai jenis gerusan dasar sungai dengan fokus pada mekanisme dasar dan parameter yang mempengaruhi gerusan jembatan. Analisis batimetri dengan mengidentifikasi 14 lubang gerusan utama dengan kedalaman antara 1,3 dan 3,5 m dari dasar sungai yang tidak terganggu. Analisis khusus gerusan jembatan dilakukan dengan menggunakan sifat hidraulik sungai yang diperoleh melalui simulasi dengan model hidraulik satu dimensi HEC RAS.	Hasil investigasi menunjukkan bahwa lubang gerusan berasal dari jembatan, tikungan, dan gerusan dasar sungai yang keras. Berdasarkan simulasi gerusan, jembatan yang diteliti menunjukkan risiko yang lebih besar untuk gerusan abutmen dan gerusan pilar dibandingkan dengan gerusan kontraksi. Jembatan Flygarebron menunjukkan potensi risiko tertinggi untuk gerusan abutmen dan dermaga, sedangkan jembatan Kristian II memiliki risiko tertinggi untuk gerusan kontraksi.
10	<i>Experimental and HEC-RAS Modelling of Bridge Pier Scouring</i> (Pemodelan	Noor et al. (2020)	Penelitian difokuskan pada jembatan Sungai Kabul dekat Peshawar, Pakistan. Analisis dilakukan secara eksperimen laboratorium dan hasilnya	Hasil eksperimen dan analisis HEC-RAS menunjukkan bahwa pilar persegi menghasilkan kedalaman gerusan yang lebih besar

NO	Judul Penelitian	Peneliti	Metode Penelitian	Kesimpulan
	Eksperimental dan HEC-RAS untuk Gerusan Pilar Jembatan)		dibandingkan dengan hasil pemodelan HEC-RAS. Pilar yang digunakan berbentuk melingkar dan persegi. Data geometri yang digunakan dalam analisis HEC-RAS menggunakan data DEM hasil analisis QGIS. Eksprimen laboratorium dilakukan sebanyak 10 percobaan dengan menggunakan debit dan kedalaman aliran yang bervariasi. Hasil kedalaman gerusan di hulu kemudian dibandingkan dengan hasil pemodelan HEC-RAS.	dibandingkan dengan pilar melingkar. Tren yang sama juga terjadi pada dimensi lubang gerusan. Perbandingan hasil eksperimen dengan analisis HEC-RAS menunjukkan bahwa hasil analisis HEC-RAS memberikan nilai kedalaman gerusan yang lebih kecil.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini dilaksanakan di Sungai Way Tebu tepatnya di lokasi Jembatan Way Sumanda–Sukamulya (jembatan nomor 1802.3.208.001) pada koordinat $5^{\circ}23'21.41''\text{S}$, $104^{\circ}48'36.27''\text{E}$, Desa Sumanda Kecamatan Pugung Kabupaten Tanggamus Provinsi Lampung.



Gambar 12 Lokasi Jembatan Way Sumanda–Sukamulya
Sumber : Hasil Analisis Arc Gis, 2024

3.2. Jenis Data dan Metode Pengumpulan Data

Data yang diperlukan dalam penelitian ini ada dua yaitu data sekunder dan data primer. Data sekunder yaitu data yang didapatkan tidak berasal dari penelitian/observasi langsung di lapangan oleh peneliti, tetapi didapat dari literatur atau sumber lain seperti penelitian terdahulu, maupun data dari dinas/instansi lain. Sedangkan data primer adalah data yang didapat dari penelitian/observasi langsung oleh peneliti.

3.2.1. Jenis Data

1. Data Sekunder

Data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini yaitu data curah hujan stasiun terdekat dan data spasial lain. Data curah hujan Tahun 2012-2022 pada stasiun R.011 dan PH.020 diperoleh dari Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Mesuji-Sekampung. Data spasial berupa data *shapefile* terdiri dari peta Rupa Bumi Indonesia, Peta struktur ruang Kabupaten Tanggamus dan peta tutupan lahan diperoleh dari berbagai sumber seperti Web Tanah Air Indonesia dan dinas/instansi terkait seperti Dinas PUPR Kabupaten Tanggamus.

2. Data Primer

Data primer yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

- 1) data kecepatan sesaat di lokasi studi
- 2) data gradasi butiran sedimen dasar di sekitar jembatan
- 3) data geometri sungai yang terdiri dari profil melintang dan memanjang sungai
- 4) data teknis jembatan yang terdiri dari bentuk dan dimensi pilar dan abutmen jembatan.

3.2.2. Metode Pengumpulan Data

Adapun metode pengumpulan data dilakukan sebagai berikut:

1) Tahap Persiapan

Persiapan sebelum pengumpulan data yaitu inventarisir kebutuhan data yang diperlukan dan juga persiapan administrasi meliputi surat menyurat berupa surat permohonan data dan izin melakukan penelitian.

2) Pengumpulan data sekunder

Pengumpulan data sekunder dilakukan terhadap data curah hujan stasiun terdekat, data DEMNAS, Peta Rupa Bumi Indonesia (RBI), peta struktur ruang dan tutupan lahan Kabupaten Tanggamus dalam bentuk *shapefile*. Pengumpulan data curah hujan dilakukan dengan mengajukan permohonan data ke BBWS Mesuji-Sekampung. Pengumpulan data DEMNAS, *shapefile* peta Rupa Bumi Indonesia (RBI) dan Peta tutupan lahan dilakukan dengan mengunjungi Web <https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/> kemudian melakukan *download* terhadap data yang diperlukan. Sedangkan data *shapefile* Struktur Ruang Kabupaten Tanggamus didapat dari Dinas PUPR Kabupaten Tanggamus dengan melakukan permohonan data ke dinas tersebut.

3) Pengumpulan data primer

Pengumpulan data primer dilakukan dengan survey dan observasi pengamatan langsung di lokasi studi. Kegiatan pengumpulan data primer dilakukan sebagai berikut:

a. Pengukuran kecepatan sesaat

Pengukuran kecepatan sesaat dilakukan dengan menggunakan alat *current meter* pada bagian hulu, tengah (pada lokasi jembatan) dan pada bagian hilir jembatan.

b. Pengukuran gradasi butiran sedimen dasar

Data gradasi butiran sedimen dasar dilakukan dengan pengambilan *sample* sedimen dasar pada lokasi hulu, tengah dan hilir jembatan. *Sample*

sedimen yang diperoleh kemudian dilakukan analisis saringan untuk mendapatkan data gradasi butiran yang diperlukan.

c. Pengukuran geometri sungai

Pengukuran data geometri sungai dilakukan dengan menggunakan bantuan alat ukur topografi *Total Station* (TS). Data geometri yang diukur berupa data situasi sungai pada lokasi jembatan, profil melintang (*cross section*) sungai sebanyak lima *cross section* di sepanjang 100 m pada bagian hulu jembatan dan 100 m pada bagian hilir jembatan.

d. Pengukuran data teknis jembatan

Data teknis jembatan yang diambil yaitu berupa data bentuk dan dimensi pilar dan abutmen jembatan. Pengukuran data tersebut dilakukan dengan mengukur langsung di lapangan dengan menggunakan alat ukur panjang (meteran).

3.3. Metode Analisis Data

Analisis data dilaksanakan setelah kegiatan pengumpulan data selesai dilakukan. Tahapan analisis data meliputi: analisis hidrologi, analisis data topografi, analisis gradasi butiran, analisis hidrolika, analisis gerusan (*scouring*) dan perancangan struktur pengendali gerusan.

3.3.1. Analisis Hidrologi

Analisis hidrologi dilakukan setelah analisis spasial untuk memperoleh peta daerah tangkapan air selesai dan data curah hujan terkumpul. Analisis hidrologi dimaksudkan untuk memprediksi besarnya debit banjir rancangan dengan berbagai kala ulang.

3.3.2. Analisis Data Topografi

Analisis data topografi dilakukan terhadap data hasil pengukuran topografi. Data pengukuran di lapangan masih berupa bacaan alat ukur. Data tersebut kemudian dianalisis sehingga didapatkan data geometri sungai meliputi peta situasi

dan potongan melintang sungai. Selain itu juga didapatkan data geometri jembatan diantaranya data dimensi pilar dan abutmen jembatan yang digambarkan dalam potongan memanjang jembatan.

3.3.3. Analisis Gradasi Butiran

Analisis gradasi butiran dilakukan terhadap *sample* sedimen dasar yang diambil dari lokasi studi. Analisa distribusi gradasi butiran sedimen mengacu SNI ASTM C136 : 2012 tentang metode uji untuk analisis saringan agregat kasar atau agregat halus. Alat dan bahan yang digunakan dalam uji analisis saringan yaitu:

1. Satu set saringan
2. Pengguncang Saringan Mekanis (*Sieve Shaker*)
3. Timbangan ketelitian 0,01 gram
4. Kontainer
5. Oven
6. *Sample* sedimen

Tahapan uji analisis saringan di laborotarium sebagai berikut:

1. Menyiapkan benda uji masing-masing *sample* sedimen ke dalam kontainer yang telah diberi tanda sesuai jenis sample (Hulu Ka, Hulu Tg, Hu Ki, As Ka, As Tg, As Ki, Hilir Ka, Hilir Tg, dan Hilir Ki)
2. Mengeringkan *sample* sedimen yang telah disiapkan dengan oven pada suhu 110°C selama 24 jam.
3. Mengeluarkan *sample* uji dari oven setelah 24 jam dan mendinginkan sampai suhu ruang
4. Menimbang *sample* yang telah dingin, dan kemudian mencatat berat sample sebelum diuji (W)
5. Menempatkan *sample* uji ke dalam saringan yang telah disusun sedemikian rupa sehingga saringan dengan deameter paling besar berada pada urutan paling atas dan berturut-turut diikuti dengan deameter saringan yang lebih kecil berada di bawahnya dengan pan berada pada susunan paling bawah, *sample* uji sedimen yang akan diayak diletakan pada saringan yang paling atas dan kemudian ditutup dengan tutup saringan.

6. Mengayak sample dengan menggunakan *Sieve Shaker* selama 15 menit dan mendiamkan selama lima menit setelah *Sieve Shaker* mati secara otomatis.
7. Menimbang *sample* yang tertahan pada masing-masing saringan dan kemudian mencata pada kertas kerja.
8. Menjumlahkan berat tertahan masing-masing saringan (W_1) dan membandingkan selisih dengan berat total sample sebelum dilakukan uji (W)
9. Selisih jumlah berat tertahan masing-masing saringan (W_1) dan berat total sample sebelum dilakukan uji (W) harus $<2\%$, jika lebih 2% maka lakukan koreksi bila perlu lakukan pengujian ulang dari langkah 1 s.d 8
10. Mengulangi langkah 1 s.d 9 untuk sample lain yang berbeda.
11. Menghitung % lolos masing-masing deameter saringan.

3.3.4. Analisis Hidrolika

Analisa hidrolika dilakukan dengan menggunakan software HEC-RAS. Pemodelan dilakukan berdasarkan data kecepatan sesaat yang diukur di lokasi penelitian yang dikonversi menjadi debit banjir sesaat. Besarnya debit banjir hasil pengukuran kemudian menjadi input dalam analisis hidrolika dengan koefisien manning yang ditentukan. Elevasi muka air hasil analisis disandingkan dengan elevasi muka air hasil pengukuran untuk melakukan kalibrasi koefisien manning.

3.3.5. Analisis Gerusan

Analisis gerusan dilakukan menggunakan program HEC-RAS 1D. Berikut merupakan tahapan analisis gerusan dengan software HEC-RAS : 1) Membuat file project, 2) Membuat data geometri sungai pada menu geometri data, 3) Menginput data aliran pada menu *steady flow analysis* dan *Running steady flow analysis*, 4) Melakukan analisis gerusan lokal pada menu *Hydraulic Design Function* (Banna, 2023).

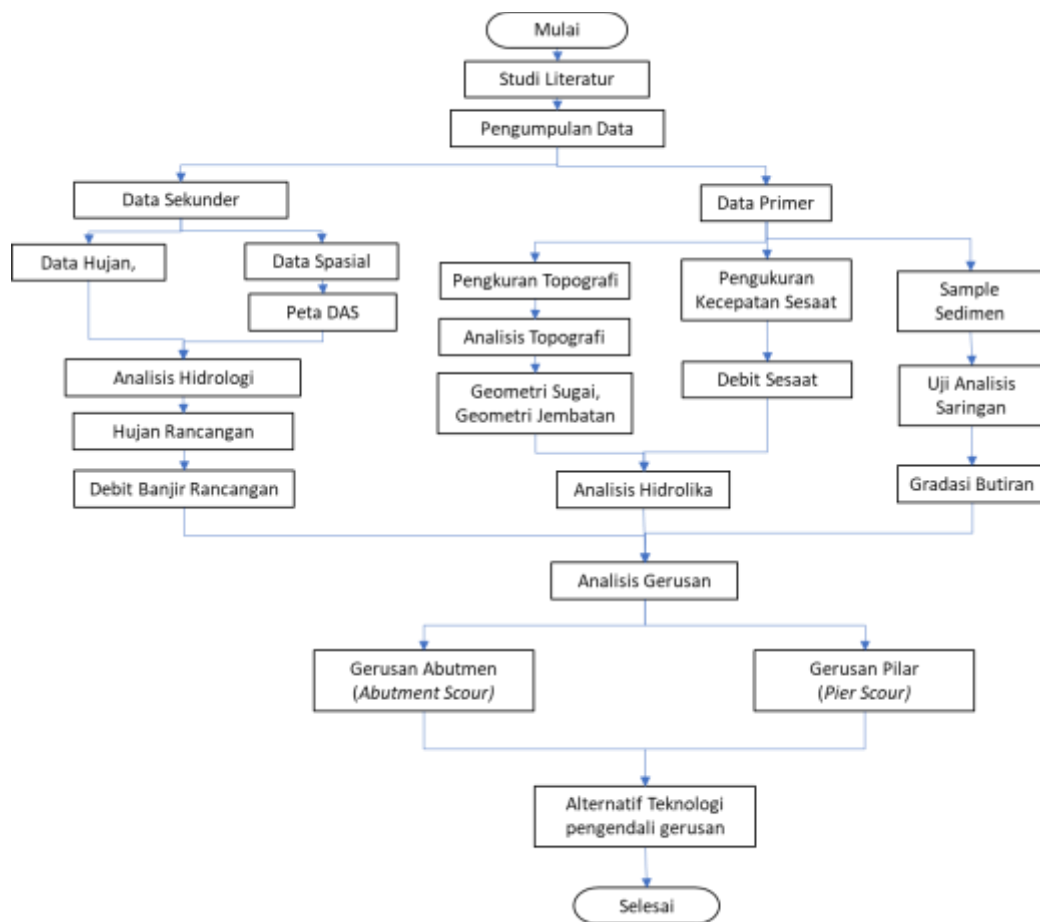
3.3.6. Perancangan Struktur Pengendali Gerusan

Perancangan struktur pengendalian gerusan pada penelitian ini dipilih dengan menggunakan struktur rip-rap. Perancangan struktur dilakukan berdasarkan hasil

analisis parameter aliran seperti kecepatan dan kedalaman aliran untuk mendapatkan ukuran/dimensi partikel rip-rap yang sesuai. Selanjutnya berdasarkan ukuran partikel (D_{50}) rip-rap terpilih akan dihitung ketebalan lapisan rip-rap yang akan digunakan.

3.4. Bagan Alir Penelitian

Secara rinci metodologi penelitian ini disajikan dalam bagan alir Gambar 13 berikut:



Gambar 13. Diagram alir penelitian
Sumber: Hasil Analisis, 2024

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan pada bab sebelumnya, maka disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Hasil analisis gerusan dengan *Software* HEC-RAS 1D pada debit kala ulang 2 tahun sebesar 58,13 m³/det, debit 5 tahun sebesar 73,19 m³/det, debit 10 tahun sebesar 83,61 m³/det, debit 25 tahun sebesar 97,31 m³/det, debit 50 tahun sebesar 107,94 m³/det, dan debit 100 tahun sebesar 118,92 m³/det menghasilkan kedalaman maksimum gerusan pilar berturut-turut sebesar 1,6 meter, 1,69 meter, 1,74 meter, 1,80 meter, 1,85 meter, dan 1,89 meter. Gerusan abutmen kanan sebesar 2,56 meter, 2,73 meter, 2,93 meter, 3,11 meter, dan 3,25 meter, serta gerusan abutmen kiri berturut-turut sebesar 0,33 meter, 0,52 meter, 0,64 meter, 0,80 meter, 0,92 meter dan 1,02 meter.
2. Besarnya kedalaman gerusan lokal pada jembatan baik gerusan pilar maupun gerusan abutmen meningkat seiring dengan meningkatkannya debit banjir kala ulang. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan debit banjir memberikan pengaruh yang signifikan terhadap potensi kedalaman gerusan. Semakin tinggi debit banjir maka kedalaman gerusan maksimum pada jembatan meningkat secara logaritmik. Hubungan debit banjir kala ulang (Q_t) dan kedalaman maksimum gerusan lokal pada pilar dan abutmen jembatan (d_s) menunjukkan hubungan logaritmik yang dapat dimodelkan dengan persamaan regresi. Model persamaan regresi gerusan pilar adalah $d_s = 0,073 \ln(Q_t) + 1,569$, gerusan abutmen kanan yaitu $d_s = 0,2451 \ln(Q_t) + 2,1425$, dan persamaan regresi

gerusan abutmen kiri yaitu $ds = 0,176 \ln(Qt) + 0,2256$, dengan nilai koefisien determinasi (R^2) masing-masing sebesar 0,9693; 0,9959 dan 0,9974.

3. Untuk menanggulangi kerusakan jembatan akibat gerusan lokal pada pilar dan abutmen jembatan dapat dilakukan pengendali gerusan dengan rekayasa struktur berupa pelindung dasar (*bed armoring*) dan penanggulangan pengubah aliran (*flow-altering countermeasures*). Perlindungan dengan *bed armoring* yang umum digunakan yaitu struktur batuan riprap (*rip rap stone*). Salah satu alternatif struktur pengendali gerusan lokal pada pilar dan abutmen Jembatan Way Sumanda–Sukamulya adalah menggunakan struktur batuan riprap dengan gradasi butiran batuan kelas II yaitu ukuran D_{50} sebesar 0,229 m, tebal riprap sebesar 1,03 m untuk pilar dan sebesar 0,5 m untuk riprap abutmen.

5.2. Saran

Berdasarkan simpulan di atas maka disarankan hal-hal sebagai berikut:

1. Untuk mencegah kemungkinan lapisan di bawah riprap terbawa keluar melalui rongga-rongga riprap maka alternatif perlindungan gerusan Jembatan Way Sumanda–Sukamulya dengan struktur riprap perlu pemasangan lapisan filter di bawah riprap. Lapisan filter yang digunakan dapat berupa geotextil maupun butiran batuan kerikil. Jika menggunakan lapisan filter dari batuan kerikil maka dapat menggunakan ukuran D_{50} filter sebesar 20 mm, D_{15} filter sebesar 13 mm dan tebal lapisan filter sebesar 25 cm baik pada riprap abutmen maupun riprap pilar.
2. Untuk menindaklanjuti hasil penelitian ini maka dapat dilakukan penelitian lanjutan terkait alternatif pengendalian gerusan lokal dengan simulasi program HEC-RAS atau program sejenis sehingga dapat dilihat pengurangan kedalaman gerusan sebelum dan sesudah pengendalian gerusan. Penelitian lanjutan tersebut tidak hanya terbatas dengan alternatif struktur riprap tetapi juga dapat dikaji dengan alternatif lain. Jika memungkinkan, penelitian lanjutan tersebut juga dapat dilakukan dengan penelitian laboratorium.

DAFTAR PUSTAKA

- Amanda, T. M., Kusumastuti, D. I., Zakaria, A., Herison, A., & Wahono, E. P. (2023). Analisis Muka Air Banjir terhadap Tutupan Lahan di Sungai Bulok Kabupaten Pringsewu Provinsi Lampung. *Teras Jurnal : Jurnal Teknik Sipil*, 13(2), 535–546. <https://doi.org/10.29103/tj.v13i2.957>
- Apriliani, N. R., Priyono, P., & Alihudien, A. (2020). Tinjauan Kapasitas Abutmen Jembatan Sengkaling Malang Dengan Beban Gempa. *Jurnal Rekayasa Infrastruktur Hexagon*, 5(1), 14–28. <https://doi.org/10.32528/hgn.v5i1.3588>
- Arneson, L. A., Zevenbergen, L. W., & Clopper, P. E. (2012). *Evaluating Scour at Bridges, Fifth Edition*. Hydraulic Engineering Circular No. 18, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-HIF-12-003.
- Banna, M. F. (2023). *Kajian Gerusan Lokal Pada Pilar Jembatan Menggunakan Hec-Ras 2D (Skripsi)*. Fakultas Teknik Universitas Lampung.
- Baranwal, A., & Das, B. S. (2024). Scouring around bridge pier: A comprehensive analysis of scour depth predictive equations for clear-water and live-bed scouring conditions. *Aqua Water Infrastructure, Ecosystems and Society Journal*, 73(3), 424–452. <https://doi.org/10.2166/aqua.2024.235>
- Breusers, H. N. ., & Raudkivi, A. J. (1991). *Scouring : Hydraulic Structures Design Manual Series, Vol. 2*. Taylor&Francis. <https://www.routledge.com/Scouring-Hydraulic-Structures-Design-Manual-Series-Vol-2/Breusers-Raudkivi/p/book/9789061919834?srsId=AfmBOoqxHbfl7gWG1-U4KMnrTMerhxj19pNDgLqL5e4WeKpIkPIfhHES> (diakses Desember 2024)
- British Columbia Water Management Branch Public Safety Section. (2000). *Riprap design and construction guide*. Province of British Columbia Ministry of Environment, Lands and Parks.
- Chow, V. Te. (1984). *Hidrolika Saluran Terbuka. (Rosalina, Nensi, Terjemahan)*. Erlangga.
- Craswell, T., & Akib, S. (2020). Reducing Bridge Pier Scour Using Gabion Mattresses Filled with Recycled and Alternative Materials. *Journal Eng, I(2)*, 188–210. <https://doi.org/10.3390/eng1020013>

- Dirjen Bina Marga. (2021). SE No. 02/M/BM/2021 tentang Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan. In *Kementerian PUPR RI* (p. 1537).
- Dirjen Prasarana Wilayah Kementrian PUPR RI. (2004). *Manual perencanaan bangunan pengaman gerusan sungai untuk konstruksi jalan dan jembatan*.
- Djunur, L. H., Gaffar, F., & Kasmawati. (2020). Perubahan Penampang Saluran pada Belokan Akibat Perubahan Parameter Aliran. *Jurnal Gradasi Teknik Sipil*, 4(1), 37–45. <https://doi.org/10.31961/gradasi.v4i1.861>
- Halim, F. (2014). Pengaruh Debit Terhadap Pola Gerusan Di Sekitar Abutmen Jembatan (Uji Laboratorium Dengan Skala Model Jembatan Megawati). *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 4(1), 32–40. <https://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/jime/article/view/4459>
- Herbudiman, A., Aschuri, I., Irawan, R. R., & Mulyati, Y. (2011). *Penilaian beban, Penyelidikan Jembatan, Perencanaan Perletakan dan Sambungan lantai*. Puslitbang Jalan dan Jembatan Kementerian PU RI.
- Herman, R., & Zukaenah, K. (2024). Pengaruh Pilar Segitiga dan Pilar Setengah Lingkaran Terhadap Kedalaman Gerusan. *Jurnal Sains Dan Teknologi Tadulako*, 10(2), 80–94. <https://doi.org/https://doi.org/10.22487/jstt.v10i2.700>
- Hermawan, A., & Afianto, E. N. (2021). Analisis Angkutan Sedimen Dasar (Bed Load) Pada Saluran Irigasi Mataram Yogyakarta. *Jurnal Teknisia*, XXVI(1). <https://doi.org/10.20885/teknisia.vol26.iss1.art3>
- Huda, M. B., Lone, M. A., Rather, N. A., & Chadee, A. A. (2023). Scouring around different shapes of bridge pier. *Water Practice and Technology Journal*, 18(7), 1608–1616. <https://doi.org/10.2166/wpt.2023.108>
- Husnan, R. T., & Yulistiyanto, B. (2007). Gerusan lokal di sekitar dua abutmen dan upaya pengendaliannya. *Jurnal Dinamika Teknik Sipil*, 7(2), 117–123. https://publikasiilmiah.ums.ac.id/bitstream/handle/11617/118/5_Yulistiyanto.pdf;sequence=1
- Imran, H. A. L. (2019). *Fungsi Tiang pada Gerusan (Teori Studi Kasus)* (Zulhajji & M. Muhammadiyah (eds.); Pertama). Azkiya Publishing.
- Inamdeen, F., Larson, M., Thiere, G., & Karlsson, C. (2021). Local Scour in Rivers Due To Bridges and Natural Features . a Case Study From Rönne River , Sweden. *Journal of Water Management and Research*, 77(3), 143–161. <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1901469&dswid=8159>
- Ishak, G., & Herman, R. (2020). *Rekayasa Sungai* (EdisiPerta). Untad Press.
- Ishak, M. G. (2017). *Aliran Pada Belokan Saluran* (Edisi Pert). UNTAD Press.

- Ishak, M. G., & Tunas, I. G. (2008). Analisis aliran di belokan saluran (Studi Model Fisik dan Matematik untuk menjelaskan Fenomena Gerusan di Sungai Palu). *Majalah Ilmiah Mektek*, *X*(3), 140–146.
- Istiarto. (2011). *Problematika Jembatan di Sungai*. <https://istiarto.staff.ugm.ac.id/index.php/2011/05/problematika-jembatan/>
- Kasmawati, Yunus, M., Pradana, D., & Khumairah, N. A. (2021). Analisis Gerusan di Sekitar Pilar Jembatan Sungai Pappa' Akibat Perubahan Kecepatan Aliran. *Jurnal Rekayasa Infrastruktur Hexagon*, *6*(2), 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.32528/hgn.v6i2.6093>
- Kementerian PUPR RI. (1992). *Laporan Akhir Penelitian Bangunan Pengaman Pondasi Jembatan Terhadap Pengaruh Degradasi Dasar Sungai*. Badan Penelitian dan Pengembangan PU.
- Kementerian PUPR RI. (2021). *SE Dirjen Bina Marga No 3 Tahun 2021 tentang Pedoman Pemeriksaan Kondisi Sungai pada Jembatan*. Dirjen Bina Marga.
- Kementerian PUPR RI. (2022). *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Nomor 10 Tahun 2022 Tentang Penyelenggaraan Keamanan Jembatan Dan Terowongan Jalan* (pp. 1–19).
- Kuncoro, W. H., Wahono, E. P., Zakaria, A., & Kusumastuti, D. I. (2021). Analisis Kedalaman Gerusan Lokal (Local Scouring) di Hilir Bangunan Pelimpah (Stepped Modified Spillway) dengan Model Fisik 2D Wahyu. *Jurnal Rekayasa Sipil Dan Desain*, *9*(3), 623–634. <https://journal.eng.unila.ac.id/index.php/jrsdd/article/view/2011>
- Kurniawan, R., Sigit, S., & Bambang, S. (2017). Analisis Perubahan Morfologi Sungai Rokan Berbasis Sistem Informasi Geografi dan Penginderaan Jauh. *Jurnal Online Mahasiswa FTEKNIK*, *4*(1), 1–10. <https://jom.unri.ac.id/index.php/JOMFTEKNIK/article/view/13290>
- Kusuma, M. S. B. (2012). *Mekanika Fluida dan Hidrolika Aliran Saluran Terbuka*. Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung.
- Lagasse, P. ., Clopper, P. E., Zevenbergen, L. W., & Ruff, J. F. (2006). *Riprap Design Criteria, Recommended Specifications, and Quality Control (NCHRP Report 568)*. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board.
- Lane, E. W., Chairmen, Brown, C., & G.C.Gibson. (1947). Report Of The Subcommittee on Sediment Terminology. *Transactions, American Geophysical Union*, *28*(2), 936–938. <https://doi.org/10.1029/TR028i006p00936>
- Marsudi, S., & Lufira, R. D. (2021). *Morfologi Sungai*. AE Medika Grafika.

https://books.google.co.id/books?hl=en&lr=&id=Qb06EAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=morfologi+sungai&ots=YCSrkJfypI&sig=7V1viTJhjGONFz-DdH7ikLtw3XI&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

- Melville, B. (2002). Local Scour Depths at Bridge Foundations: New Zealand Methodology. *Proceedings of the 1st International Conference on Scour of Foundations and Was Edited by Hamn-Ching Chen and Jean-Louis Briaud. The Conference Was Held in Texas, USA*, 43–53.
- Melville, B. W., & Coleman, S. E. (2000). *Bridge Scour*. Water Resource Publication, LLC.
https://books.google.co.id/books?hl=id&lr=&id=SoIA3P1zLAEC&oi=fnd&pg=PR11&dq=bridge+scour&ots=SNm9TrS-mF&sig=XYHpkRgGLhlzWI2wU07Uq8zWWJ8&redir_esc=y#v=onepage&q=bridge scour&f=false
- Mousavi, F., & Daneshfaraz, R. (2013). Evaluating Various Factors in Calculation of Scour Depth around Bridge Piers using HEC-RAS Software , CSU2001 and Froehlich Equations. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 3(6), 398–402. <https://www.ojceu.com/main/attachments/article/28/J. Civil Eng. Urban.,59-398-402.pdf>
- Noor, M., Arshad, H., Khan, M., Khan, M. A., Aslam, M. S., & Ahmad, A. (2020). Experimental and HEC-RAS modelling of bridge pier scouring. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 74(1), 119–132. <https://doi.org/10.37934/ARFMTS.74.1.119132>
- Pangestu, A. D., & Astuti, S. A. Y. (2018). Studi gerusan di hilir bendung kolam olak tipe vluhter dengan perlindungan groundsill. *Jurnal Teknisia*, XXIII(1), 463–473. <https://journal.uii.ac.id/teknisia/article/view/10936>
- Paramudinta, A. C., Achmad, N., & Bhakty, T. E. (2021). Evaluasi Keamanan Jembatan Terhadap Debit Banjir di Sungai Sei Pare-Pare. *Jurnal Rancang Bangun Teknik Sipil*, 21–27(1), 1689–1699.
- Pemerintah Kabupaten Tanggamus. (2022). *Data Jembatan Kabupaten Tanggamus*. Pemerintah Kabupaten Tanggamus. <https://sijantan.putanggamus.com/front/jembatan> (diakses pada Tanggal 3 Desember 2024)
- Pemerintah RI. (2011). *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No 38 Tahun 2011 Tentang Sungai* (p. Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2011 No 7). Sekretariat Negara.
- Pizarro, A., Manfreda, S., & Tubaldi, E. (2020). The science behind scour at bridge foundations: A review. *Water Journal*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/w12020374>

- Pradana, A. A., Purbaningtyas, D., & Ridwan, M. (2022). Analisis Gerusan Lokal Menggunakan Metode Empiris Pada Pilar Jembatan Kuala Samboja Kabupaten Kutai Kartanegara. *Kurva S : Jurnal Keilmuan Dan Aplikasi Teknik Sipil*, 10(2), 86–99. <https://doi.org/10.31293/teknikd.v10i2.6841>
- Pratama, M. I., Legono, D., & Rahardjo, A. P. (2019). Analisis Transpor Sedimen Serta Pengaruh Aktivitas Penambangan Pada Sungai Sombe, Kota Palu, Sulawesi Tengah. *Jurnal Teknik Pengairan*, 10(2), 84–96. <https://doi.org/10.21776/ub.pengairan.2019.010.02.02>
- Purwadi, O. T., Indriana, D. K., & Lubis, A. M. (2016). Analisis Sedimentasi di Sungai Way Besai. *Jurnal Rekayasa*, 20(3), 1–12.
- Purwantoro, D. (2015). Model Pengendalian Gerusan di Sekitar Abutmen dengan Pemasangan Groundsill dan Abutmen Bersayap. *Jurnal Inersia*, XI(1), 79–89. <https://journal.uny.ac.id/index.php/inersia/article/view/9950>
- Ragilia, P. S., & Susarman. (2021). Efektifitas Struktur Groundsill Dalam Mengurangi Gerusan Di Dasar Sungai: Kajian Literatur. *Journal Of Infrastructural in Civil Engineering (JICE)*, 02(01), 8–15.
- Raissa, A. V. A., Priyambodho, B. A., Purnaditya, N. P., Wigati, R., & Subekti. (2023). The Effect Of Groundsill Height On Bridge Pillar Flow Characteristics. *Fondasi: Jurnal Teknik Sipil*, 12(2), 163–173. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.36055/fondasi.v12i2.22047>
- Raudkivi, A. J., & Ettema, R. (1983). Clear-Water Scour at Cylindrical Piers. *Journal Hydraulic Engineering*, 109, 338–350. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:3\(338\)](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:3(338))
- Rauf, I., Gaus, A., & Jaelan, S. (2023). Eksperimen Laboratorium Pengaruh Hidung Pilar Jembatan Terhadap Kedalaman Gerusan Lokal Setimbang. *Jurnal Teknik Sipil*, 13(02), 313–323. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.29103/tj.v13i2.872> (Received:
- Rohmah, N., Nugroho, J., & Nugroho, E. O. (2022). *Pemodelan Gerusan Lokal Pada Abutment Jembatan Menggunakan SSIIM-2* (pp. 2501–2513). Pertemuan Ilmiah Tahunan ke - 39 HATHI.
- Saputro, E. A., Wahono, E. P., & Zakaria, A. (2021). Analisis Perbandingan Kedalaman Gerusan Lokal (Local Scouring) di Hilir Bangunan Pelimpah (Ogee and Stepped Spillway) dengan Model Fisik 2D. *Jurnal Rekayasa Sipil Dan Desain*, 9(3), 523–532. <https://journal.eng.unila.ac.id/index.php/jrsdd/article/view/1914>
- Sasidharan, M., Parlikad, A. K., & Schooling, J. (2022). Risk-informed asset management to tackle scouring on bridges across transport networks. *Structure and Infrastructure Engineering Journal*, 18(9), 1300–1316.

<https://doi.org/10.1080/15732479.2021.1899249>

Sejati, W., & Kadri, T. (2021). *Transportasi Sedimen* (Nu. Wahid (ed.); edisi pert). Wawasan Ilmu.

Setiati, N. R., Guntorojati, I., & Kurniawati, E. (2019). Analisis Penanganan Dampak Bahaya Gerusan Aliran Sungai Pada Struktur Pilar Jembatan. *Jurnal Jalan-Jembatan*, 36(1), 41–53. <https://binamarga.pu.go.id/jurnal/index.php/jurnaljalanjembatan/article/view/501>

Setiati, N. R., & Kurniawati, E. (2021). Analisis Perkuatan Bangunan Bawah Jembatan Dengan Rip-Rap. *Jurnal Jalan-Jembatan*, 38(1), 21–33. <https://binamarga.pu.go.id/jurnal/index.php/jurnaljalanjembatan/article/view/945>

Shaskia, N., & Rizalihadi, M. (2019). Pola Gerusan Lokal Akibat Perlakuan Pada Abutmen Jembatan. *Jurnal Teknik Sipil*, 8(2), 60–67. <https://doi.org/10.24815/jts.v8i2.14055>

Singh, N. B., Devi, T. T., & Kumar, B. (2020). The local scour around bridge piers— a review of remedial techniques. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 28(S1), 1–14. <https://doi.org/10.1080/09715010.2020.1752830>

Soemarto. (1986). *Hidrologi Teknik*. Usaha Nasional.

Sofayana, R. N. (2020). *Studi Gerusan Lokal di Sekitar Pilar Jembatan Sungai Way Tapus Batu Putu Kecamatan Teluk Betung Utara, Kota Bandar Lampung dengan Model Skala Kecil di Laboratorium (Skripsi)*. Institut Teknologi Sumatera.

Subarkah, I. (1980). *Hidrologi Untuk Perencanaan Bangunan Air*. Idea Dharma.

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), 1017–1028. <https://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/jss/article/view/20859>

Surat Edaran Dirjen Bina Marga No: 05/ SE/Db/2017 Tentang Perubahan Surat Edaran Direktur Jenderal Bina Marga Nomor: UM.01.03-Db/242 Tentang Penyampaian Ketentuan Desain Dan Revisi Desain Jalan Dan Jembatan, Serta Kerangka Acuan Kerja Pengawasan Teknis Unt, 1 (2017).

Suripin. (2003). *Sistem Drainase Perkotaan yang Berkelanjutan*. Andi Offset.

Triadmodjo, B. (2008). *Hidrologi Terapan*. Beta Offset.

Ummah, M. S. (2018). *Guide to Bridge Technology Part 8: Hydraulic Design of*

Waterway Structures (Second edi). Austroads (the peak organisation of Australasian road transport and traffic agencies). https://austrroads.gov.au/publications/bridges/agbt08-18/media/AGBT08-18_Guide_to_Bridge_Technology_Part_8_Hydraulic_Design_of_Waterway_Structures.pdf

Uwais,A, M. R. (2018). Analisa Scouring Pada Bagian Bawah Jembatan, Pada Rencana Sudetan Kali Tanggul, Jember, Jawa Timur (Skripsi). In *Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, Dan Kebumihan Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Wabia, K., Bakarbesy, D., & Anggaraeni, D. (2022). Evaluasi Kontruksi Jembatan Kali Kemiri Akibat banjir dan gerusan di Kabupaten Jayapura Provinsi Papua. *Jurnal Portal Sipil*, 11(2), 40–56. <https://doi.org/https://doi.org/10.58839/portal.v11i1.1069>

Wahono, E. P., Legono, D., Istiarto, & Yulistiyanto, B. (2014). Environmental Flow Assessment Using Water-Sediment Approach at the Sekampung River, Indonesia. *Open Journal of Modern Hydrology*, 04(04), 164–172. <https://doi.org/10.4236/ojmh.2014.44016>

Wattimury, A. B., Buyang, C. G., & Kalalimbong, A. (2023). Evaluasi Gerusan Di Jembatan Waikaka Menggunakan Software Hec-Ras 5.0.7. *Jurnal Simetrik*, 13(2), 734–740. <https://doi.org/https://doi.org/10.31959/js.v13i2.1169>

Zulfan, J. (2017). Optimasi Hidraulik Penanganan Gerusan di Hilir Bendung (Studi kasus : Bendung Rengrang, Jawa Barat). *Jurnal Teknik Hidraulik*, 8(1), 15–28. <https://doi.org/https://doi.org/10.32679/jth.v8i1.217>

Zulfan, J., & Yiniarti, E. K. (2018). Efektivitas Krib Untuk Mengurangi Gerusan Di Tikungan Sungai Bengawan Solo. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 9(2). <https://doi.org/10.32679/jth.v9i2.582>