



MODUL HIDRAULIKA JEMBATAN

Robby Yussac Tallar



PROGRAM STUDI S1 TEKNIK SIPIL
UNIVERSITAS KRISTEM MARANATHA
BANDUNG

DAFTAR ISI

BAB 1. HIDRAULIKA JEMBATAN.....	7
1.1 Mengapa Mempelajari Hidraulika Jembatan?	7
1.2 Kegagalan Jembatan.....	7
1.2.1 Gerusan Lokal	8
1.2.2 Runtuhnya Pilar Jembatan Cipamingkis	11
1.3 Tahapan Perencanaan Jembatan	12
BAB 2. PROFIL ALIRAN AIR DENGAN ADANYA JEMBATAN.....	17
2.1. Geometri Saluran.....	17
2.2 Klasifikasi Aliran Saluran Terbuka	18
2.2.1 Aliran Permanen Seragam (<i>steady uniform flow</i>)	20
2.3 Penyempitan Saluran.....	21
2.4. Energi Spesifik (<i>Specific Energi</i>)	23
2.5 Kontinuitas Aliran dan Hukum Kekekalan Energi	25
2.5.1 Energi.....	26
2.5.2 Kekekalan Energi	26
2.6 Profil Muka Air	27
2.7 Studi Kasus.....	29
BAB 3. FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI PERFORMA HIDROLIKA SUATU JEMBATAN	
.....	32
3.1 Rasio Bukaan Jembatan (M).....	32
3.2 Perbandingan Panjang Jalan Air dan Lebar Bukaan Jembatan, L/B	33
3.3 Eksentrisitas, (<i>e</i>)	33
3.4 <i>Skew</i> (ϕ).....	34
3.5 Kedalaman Aliran (Y)	35
3.6 Bentuk Bukaan Jalan Air.....	35
3.7 Bilangan Froude (Fr), Aliran Subkritis dan Superkritis	36
3.8 Gerusan pada Jembatan	39
4.1 Menghitung <i>Backwater</i>	47
4.1.1 Rangkuman Data Lapangan.....	47
4.1.3 Penjelasan Latar Belakang Metode.....	48
4.1.4 Metode USGS dalam Menghitung Aliran Air Keluar Secara Tidak Langsung.....	50
4.1.5 Kekurangan Metode USGS dalam Menghitung <i>Backwater</i>	52
4.2 Pendekatan Umum untuk Estimasi <i>Afflux</i>	54
4.2.1 Penjelasan Metode Teoritis dan Empiris	54
4.2.2 Metode Berdasarkan Konservasi Energi	55
4.2.3 Metode Berdasarkan Konservasi Momentum	56

4.2.4 Aliran Orifis	58
BAB 5. ANALISIS ALIRAN YANG MELEWATI PILAR DAN <i>TRESTLE</i>	60
5.1 Penyempitan Aliran karena Adanya Jembatan	63
5.2 <i>Trestle</i>	68
5.2.1 Aliran melalui Pilar <i>Trestles</i>	69
BAB 6 ANALISIS ALIRAN AIR YANG MELUAP DI ATAS <i>EMBANKMENT</i>	72
6.1 Pola Aliran Hidrolika yang Meluap di atas <i>Embankment</i>	72
6.2 Persamaan Aliran Air Keluar untuk Aliran yang Meluap di atas <i>Embankment</i>	73
6.3 Zona Aliran	75
BAB 7 MENINGKATKAN EFISIENSI HIDROLIKA ALIRAN AIR YANG MELALUI JEMBATAN	79
7.1 <i>Entrance Rounding</i>	79
7.2 <i>Channel Improvement</i>	82
7.3 <i>Wingwall</i>	92
BAB 8 GERUSAN PADA PILAR DAN ABUTMEN JEMBATAN	95
8.1 Pilar Jembatan	97
8.2 Abutmen.....	104
Daftar Pustaka:	108

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1-1 Persentase Kegagalan Struktur Jembatan karena Bencana Alam (sumber: Setiati, N. R, et. al. 2019).....	8
Gambar 1-2 Skema Pergerakan Partikel Sedimen (sumber: Rustiati, Nina. B. 2007).....	9
Gambar 1-3 Hubungan antara Diameter Butiran dan Kecepatan (sumber: Rustiati, Nina. B. 2007)	10
Gambar 1-4 Profil Aliran di Sekitar Abutment Jembatan (sumber: Rustiati, Nina. B. 2007)	10
Gambar 1-5 Mekanisme Gerusan Lokal pada Pilar Jembatan (sumber: Setiati, N. R, et. al. 2019).....	10
Gambar 1-6 Sketsa Jembatan Cipamingkis Sebelum Runtuh (sumber: Setiati, N. R, et. al. 2019).....	11
Gambar 1-7 Sketsa Penurunan Pilar P1 (sumber: Setiati, N. R, et. al. 2019).....	11
Gambar 1-8 Pilar Jembatan Cipamingkis mengalami Penurunan (sumber: Setiati, N. R, et. al. 2019).....	12
Gambar 1-9 Variation of competent mean velocity (V_{SC}) with the median diameter by weight (D_{50}) and depth of flow. The competent mean velocity is that at which the flow is just competent to move the exposed bed material at the scoured depth (sumber: Les Hamill. 1999)	15
Gambar 1-10 Approximate pier scour depth, d_{SP} , for various pier shapes aligned to the approach flow, where b_p is the pier width perpendicular to the flow. If the depth of flow exceeds $5b_p$ then d_{SP} should be increased by 50% (sumber: <i>Les Hamill. 1999</i>).....	16
Gambar 2-1 Bentuk-Bentuk Potongan Melintang Saluran Terbuka (sumber: Frida Amanda. 2017).....	17
Gambar 2-2 Penampang Saluran Persegi Panjang (sumber: Harianja, J.A dan Gunawan, S. 2007)	18
Gambar 2-3 Pias Aliran Tetap Seragam (sumber: Frida Amanda. 2017).....	20
Gambar 2-4 Sketsa Aliran yang Melalui Penyempitan; (a) denah; (b) tampak tegak; (c) tampak tegak dengan asumsi kehilangan energi akibat gesekan = 0 (sumber: Harianja, J.A dan Gunawan, S. 2007)	23
Gambar 2-5 Parameter Energi Spesifik (sumber: Harianja, J.A dan Gunawan, S. 2007)	24
Gambar 2-6 Profil Aliran melalui Penyempitan (sumber: Harianja, J.A dan Gunawan, S. 2007)	25
Gambar 2-7 Energi Spesifik (sumber: K. M. Arsyad. 2017)	26
Gambar 2-8 Konservasi Energi (sumber: K. M. Arsyad. 2017).....	27
Gambar 2-9 Profil Aliran Melewati Penyempitan (sumber: https://doi.org/10.1016/S0167-5648(08)70443-X)	28
Gambar 2-10 Lokasi Jembatan Bahodopi (sumber: Moerwanto, A.S dan Zulfan, J. 2020).....	30
Gambar 2-11 Lokasi Jembatan Dampala (sumber: Moerwanto, A.S dan Zulfan, J. 2020).....	31
Gambar 3-1 Rasio Buka-an Jembatan (sumber: culvert and bridge material.pdf">http://196.189.45.87>culvert and bridge material.pdf).....	32
Gambar 3-2 Rasio L/b (sumber: culvert and bridge material.pdf">http://196.189.45.87>culvert and bridge material.pdf)	33
Gambar 3-3 Eksentrisitas (sumber: culvert and bridge material.pdf">http://196.189.45.87>culvert and bridge material.pdf)	34
Gambar 3-4 Skew (sumber: culvert and bridge material.pdf">http://196.189.45.87>culvert and bridge material.pdf).....	34
Gambar 3-5 Perbandingan antara Jalan Air Normal dan Bersudut; Tipe Skew maupun Sudutnya (ϕ) (sumber: Les Hamill.1999).....	35
Gambar 3-6 Bentuk Jalan Air (sumber: culvert and bridge material.pdf">http://196.189.45.87>culvert and bridge material.pdf)	36
Gambar 3-7 Aliran Laminar dan Turbulen (sumber: reksun-mod5.pdf">www.emodul.untad.ac.id>reksun-mod5.pdf)	36
Gambar 3-8 Kehilangan Energi dari x_1 ke x_2 (sumber: K. M. Arsyad.2017)	38
Gambar 3-9 Gerusan pada Jembatan (sumber: culvert and bridge material.pdf">http://196.189.45.87>culvert and bridge material.pdf)	40
Gambar 3-10 Variasi Kedalaman Gerusan Lokal (d_{SL}) dan Kecepatan (sumber: culvert and bridge material.pdf">http://196.189.45.87>culvert and bridge material.pdf)	41
Gambar 3-11 Degradasi dan Agradasi (sumber: culvert and bridge material.pdf">http://196.189.45.87>culvert and bridge material.pdf).....	41
Gambar 3-12 Gerusan Kontraksi (sumber: culvert and bridge material.pdf">http://196.189.45.87>culvert and bridge material.pdf).....	42
Gambar 3-13 Pola Aliran dan Lubang Gerusan pada Pilar Silinder (sumber: culvert and bridge material.pdf">http://196.189.45.87>culvert and bridge material.pdf).....	43
Gambar 3-14 Gerusan pada Abutment (sumber: culvert and bridge material.pdf">http://196.189.45.87>culvert and bridge material.pdf)	45
Gambar 3-15 Gerusan pada Abutment (sumber: culvert and bridge material.pdf">http://196.189.45.87>culvert and bridge material.pdf)	45
Gambar 3-16 Pengaruh Koefisien η_3 terhadap Sudut Datang Aliran (sumber: Rustiati, N. B. 2007)	46
Gambar 4-1 Profil Aliran Backwater melalui Penyempitan yang Diamati di Laboratorium (sumber: G. Seckin et al. 2009)	48

Gambar 4-2 Profil Aliran Backwater melalui Penyempitan yang Diamati di Lapangan (sumber: G. Seckin et al. 2009)	48
Gambar 4-3 Aliran pada Jembatan: Rencana, Sektor, Profil (sumber: Hunt, J. H dan Brunner, G. W. 1995) ..	51
Gambar 4-4 Ilustrasi Afflux (sumber: A Kirby and K Guganesharajah, 2004).....	54
Gambar 4-5 Tampak Elevasi Penyempitan Saluran (Analisis Energi) (sumber: A Kirby and K Guganesharajah, 2004).....	55
Gambar 4-6 Tampak Elevasi Penyempitan Saluran (Analisis Momentum) (sumber: A Kirby and K Guganesharajah, 2004).....	57
Gambar 4-7 Aliran Orifis (sumber: A Kirby and K Guganesharajah, 2004)	59
Gambar 5-1 Aliran Air yang Melewati Jembatan (sumber: Les Hamill. 1999)	60
Gambar 5-2 Bentuk-Bentuk Pilar (sumber: DHI, 2009).....	61
Gambar 5-3 Profil Aliran yang melalui Jembatan dengan Penyempitan Saluran (Aliran Subkritis) (<i>sumber: cross-drainageHydraulic-Structures-Novak</i>)	64
Gambar 5-4 Profil Aliran dengan Kondisi “Choking” (sumber: <i>cross-drainageHydraulic-Structures-Novak</i>).....	66
Gambar 5-5 Perhitungan Aliran Air Keluar yang Melalui Halangan (sumber: <i>cross-drainageHydraulic-Structures-Novak</i>)	67
Gambar 5-6 Tampak Samping Trestle (sumber: Kevin, et al. 2019)	68
Gambar 5-7 Tampak Depan Trestle (sumber: Kevin, et al. 2019)	69
Gambar 5-8 Nilai B pada Persamaan Nagler untuk Aliran yang Melewati Pilar (sumber: Les Hamill. 1999) ..	70
Gambar 5-9 Aliran yang Melalui Batang Pilar Trestle, Yarnell (sumber: Les Hamill. 1999).....	70
Gambar 6-1 Variabel utama untuk menggambarkan aliran meluap di atas embankment (sumber: Chen, Y. H and Anderson, B. A. 1987).....	73
Gambar 6-2 Rangkuman aliran terbenam mula-mula dan batasan transisi aliran bebas (<i>sumber: Chen, Y. H and Anderson, B. A. 1987</i>)	73
Gambar 6-3 Koefisien aliran air keluar untuk aliran yang meluap di atas embankment (sumber: Chen, Y. H and Anderson, B. A. 1987).....	75
Gambar 6-4 Zona aliran hidrolika dan aliran yang meluap di atas embankment (sumber: Chen, Y. H and Anderson, B. A. 1987)	77
Gambar 6-5 Distribusi tekanan teoritis pada kemiringan di hilir sungai terhadap aliran yang meluap di atas embankment setinggi 4 kaki (sumber: Simons, Li & Associates, Inc. 1988).....	78
Gambar 6-6 Variasi tekanan teoritis negatif maksimum yang terbentuk pada variasi kedalaman aliran air yang meluap di atas embankment (sumber: Simons, Li & Associates, Inc. 1988)	78
Gambar 7-1 Entrance Rounding: Salah Satu Variabel Hidrolika yang Mempengaruhi Performa Hidrolika Jembatan, (sumber: Les Hamill.1999).....	80
Gambar 7-2 Model Abutment Jembatan (sumber: Purnomo, S. N, et al. 2016).....	81
Gambar 7-3 Tampak Atas Layout Pengukuran Kontur Simulasi (sumber: Purnomo, S. N, et al. 2016).....	82
Gambar 7-4 Layout Sungai Luk Ulo Segmen Hilir (sumber: Lestari, S. 2011)	83
Gambar 7-5 Kondisi Jembatan Cipamingkis Setelah Perbaikan (Pusjatan 2018) (sumber: Setiati, N. R dan Kurniawati, E. 2021)	85
Gambar 7-6 Kondisi Pilar Jembatan Cipunegara (Pusjatan 2019) (sumber: Setiati, N. R dan Kurniawati, E. 2021)	85
Gambar 7-7 Skema Penanganan Gerusan pada Kepala Jembatan dengan Rip-Rap (sumber: Setiati, N. R dan Kurniawati, E. 2021)	86
Gambar 7-8 Sketsa Perkuatan Pilar dengan Rip-Rap (sumber: Setiati, N. R dan Kurniawati, E. 2021)	87
Gambar 7-9 Sketsa Tampak Atas Bentuk Rip-Rap (sumber: Setiati, N. R dan Kurniawati, E. 2021)	87
Gambar 7-10 Sketsa Tampak Samping Bentuk Rip-Rap (sumber: Setiati, N. R dan Kurniawati, E. 2021).....	88
Gambar 7-11 Sketsa Bentuk Rip-Rap Jembatan Cipunegara (sumber: Setiati, N. R dan Kurniawati, E. 2021).....	88
Gambar 7-12 Skema Pemasangan Bronjong pada Dinding Penahan Tanah (sumber: Setiati, N. R dan Kurniawati, E. 2021)	89
Gambar 7-13 Sketsa Bentuk Rip-Rap Jembatan Cipamingkis (sumber: Setiati, N. R dan Kurniawati, E. 2021)	89

Gambar 7-14 Sungai Kahayan dan Jembatan Kahayan yang Melintasinya (bagian yang dilingkari) (sumber: Nomeritae, et al. 2018).....	91
Gambar 7-15 Bentuk Abutment Umum (A) Vertical Wall, (B) Wing Wall, dan (C) Spill Through (sumber: Saneie. M, et al. 2018).....	92
Gambar 7-16 Skema Diagram Abutment jenis Buried Wing (sumber: Saneie. M, et al. 2018).....	93
Gambar 7-17 Kedalaman Gerusan Maksimum (ds) setelah Eksperimen (sumber: Saneie. M, et al. 2018)	93
Gambar 8.1 Dasar Fondasi Jembatan Gantung Mulai Tergerus oleh Aliran Sungai (sumber: Nenny. 2016) ...	95
Gambar 8.2 Hubungan Kedalaman Gerusan dengan Waktu (sumber: Purwantoro, D. 2015)	97
Gambar 8.3 Hubungan Kedalaman Gerusan dengan Kecepatan Geser (sumber: Purwantoro, D. 2015)	97
Gambar 8.4 Hubungan Kedalaman Gerusan (clear water dan live bed scour) dengan Waktu (sumber: Nenny. 2016).....	98
Gambar 8.5 Mekanisme Gerusan akibat Pola Aliran Air di sekitar Pilar (sumber: Nenny. 2016)	99
Gambar 8.6 Koefisien Arah Sudut Aliran (K_a) ada Pilar (sumber: Nenny. 2016)	102
Gambar 8.7 Model Abutmen Tipe Spillthrough (sumber: Abdurrosyid, J dan Fatchan, A.C. 2007)	105
Gambar 8.8 Posisi Titik-Titik Pengamatan pada Tipe Spillthrough (sumber: Abdurrosyid, J dan Fatchan, A.C. 2007).....	105
Gambar 8.9 Sketsa Lubang Gerusan (sumber: Abdurrosyid, J dan Fatchan, A.C. 2007).....	106
Gambar 8.10 Model Variasi Penempatan Plat Pelindung Abutmen dalam Saluran (sumber: Lutjito dan AD, Sudyono. 2016).....	107

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Kegagalan Jembatan.....	7
Tabel 3.1 Pengelompokkan Aliran Berdasarkan Bilangan Froude dan Reynolds pada Saluran Terbuka	37
Tabel 3.2 Variasi nilai η_1 (koefisien ukuran butiran) dan n (fungsi ukuran sedimen dan geometri halangan) terhadap d (distribusi ukuran butiran).....	46
Tabel 3.3 Koefisien Bentuk Abutment	46
Tabel 5.1 Koefisien Kehilangan Jembatan, K_B	65
Tabel 5.2 Nilai K sebagai Fungsi dari Bentuk Pilar	66
Tabel 5.3 K_N dan K_A	68
Tabel 5.4 Nilai K_A dan K_n untuk Pilar Trestle	70
Tabel 8.1 Koefisien Faktor Bentuk Pilar (sumber: Nenny. 2016).....	101

BAB 1. HIDRAULIKA JEMBATAN

1.1 Mengapa Mempelajari Hidraulika Jembatan?

Berikut ini empat alasan umum mengenai perlunya mempelajari hidraulika jembatan:

1. Jembatan baru yang memiliki struktur pilar dan/atau *abutment* (dinding penahan tanah yang memikul beban dari struktur atas dan meneruskan beban-beban tersebut ke fondasi) tidak diizinkan untuk dibangun di atas sungai tanpa terlebih dulu membuktikan secara kalkulasi atau pemodelan bahwa arus balik (*backwater*) yang ditimbulkan tidak akan menyebabkan banjir pada lahan atau properti di hulu sungai.
2. Pada lokasi yang terdapat jembatan eksisting dan banjir yang terjadi terus-menerus, analisis diperlukan untuk menentukan penyebab banjir tersebut (penyebabnya dikarenakan jembatan atau faktor lainnya yaitu debit air banjir yang terlalu besar). Jika analisis menunjukkan bahwa jembatan adalah penyebab banjir maka diperlukan perubahan rancangan struktur terhadap jembatan tersebut.
3. Apabila jembatan memberikan hambatan pada arus sungai sehingga menimbulkan banjir, maka dengan pengetahuan hidraulika jembatan akan menghasilkan rancangan yang disempurnakan sehingga banjir akibat jembatan tidak lagi menjadi masalah.
4. Dengan mempertimbangkan morfologi sungai maka bentuk, jarak, dan arah pilar maupun *abutment* jembatan akan mempengaruhi aliran air yang melalui jembatan sehingga menimbulkan gerusan di sekitar struktur jembatan. Jembatan dengan perencanaan yang baik tidak luput dari fenomena ini sehingga apabila terdapat jembatan yang dirancang dengan hidraulika yang buruk maka runtuhnya jembatan akan menjadi konsekuensi yang tidak bisa dihindari.

1.2 Kegagalan Jembatan

David W. Smith pada tahun 1976 – 1977 mempelajari 143 kegagalan jembatan di seluruh dunia yang terjadi dalam kurun waktu 1847 hingga 1975. Smith mengkategorikan kegagalan jembatan tersebut dalam sembilan kategori yaitu

Tabel 1.1 Kegagalan Jembatan

No.	Penyebab Kerusakan	Jumlah Jembatan yang Rusak	Keterangan
1	Gerakan fondasi dan gerusan sungai	70	2 gerakan tanah 1 aliran debris 66 gerusan 1 gerakan fondasi
2	Kerusakan pada badan jembatan	22	19 kerusakan/patahnya pelat

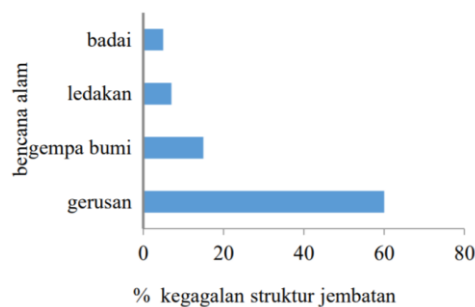
3	<i>Overload</i> dan ditabrak kapal	14	10 ditabrak kapal
4	Kerusakan saat pengangkatan	12	
5	Kerusakan saat gempa	11	
6	Kesalahan rancangan terkait material	5	
7	Angin	4	
8	<i>Fatigue</i> dan korosi	4	3 pada bahan baja tuang dan 1 korosi
	Jumlah	143	

White et al. (1992) menyimpulkan bahwa sebagian besar kegagalan jembatan di U.S disebabkan oleh banjir dan dua faktor lain terkait aliran air yaitu gerusan dan material hanyut (*debris*) yang tertumpuk pada struktur jembatan. Sedangkan, kerusakan jembatan akibat gerusan pada material bawah jembatan di sekitar fondasi adalah penyebab kerusakan yang paling sering ditemukan.

Gerusan yang terjadi pada pilar jembatan merupakan gerusan total (*total scour*), yaitu kombinasi gerusan lokal (*local scour*), gerusan umum (*general scour*), dan gerusan terlokalisasi (*localized scour/constriction scour*). Gerusan umum terjadi di sepanjang sungai yang menyebabkan degradasi dasar sungai karena adanya energi aliran air. Gerusan lokal yang terjadi pada sekitar pilar jembatan disebabkan oleh sistem pusaran air (*vortex system*) akibat gangguan pola aliran air karena adanya rintangan. Sedangkan, gerusan terlokalisasi terjadi karena penyempitan penampang sungai oleh infrastruktur sungai.

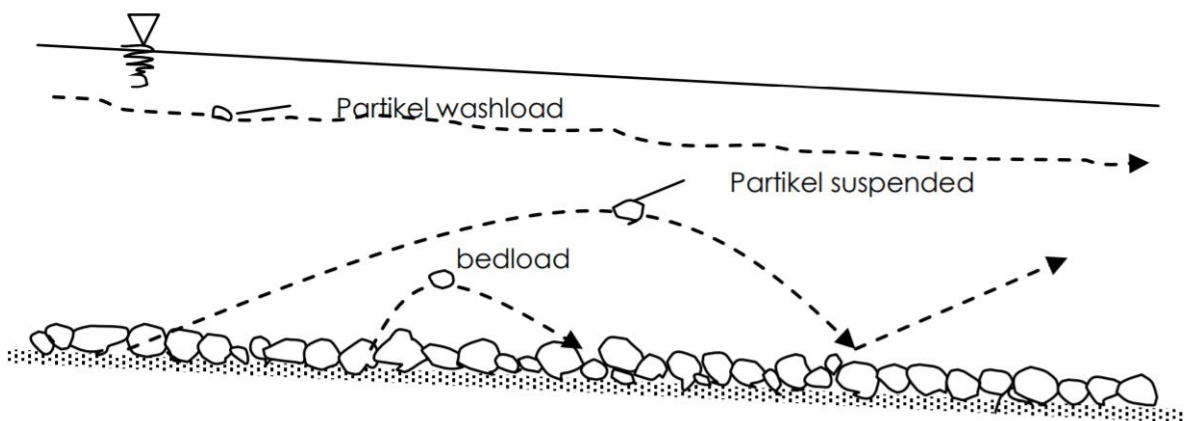
1.2.1 Gerusan Lokal

Imhof (2004) mengumpulkan data mengenai beberapa faktor utama penyebab terjadinya kegagalan struktur jembatan. Faktor-faktor tersebut adalah bencana alam berupa gempa, badai, banjir/gerusan, letusan gunung berapi, dan tsunami. Kerusakan struktur jembatan akibat banjir/gerusan menempati urutan pertama penyebab terjadinya kegagalan struktur. Persentase kegagalan struktur jembatan akibat bencana alam ditunjukkan dalam gambar di bawah ini.



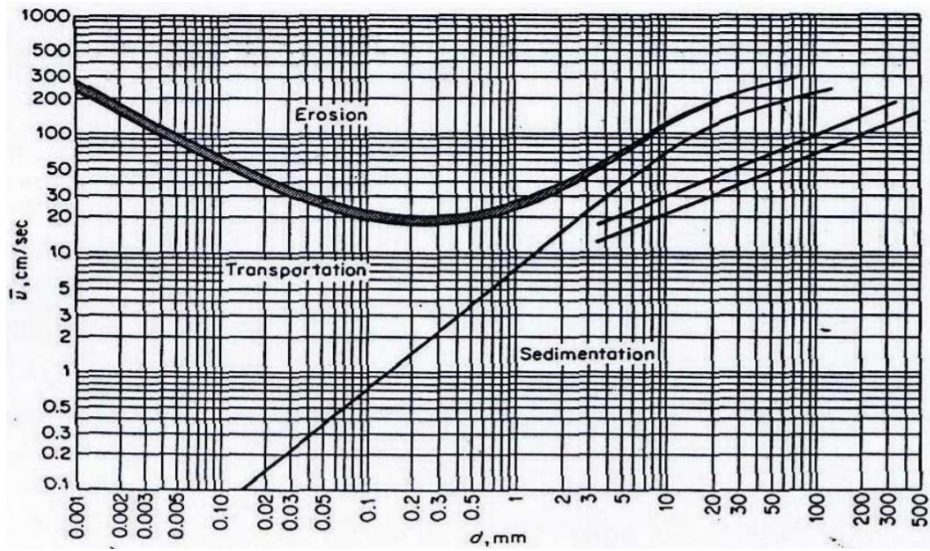
Gambar 1-1 Persentase Kegagalan Struktur Jembatan karena Bencana Alam (sumber: Setiati, N. R, et. al. 2019)

Berdasarkan tersebut, 60% kerusakan struktur jembatan diakibatkan oleh gerusan. Gerusan menimbulkan kerusakan jembatan terutama di bagian pilar dan kepala jembatan. Struktur jembatan umumnya terdiri dari dua bagian penting yaitu struktur bagian atas dan struktur bagian bawah berupa pilar dan *abutment*. *Abutment* adalah bagian konstruksi jembatan yang terletak ditepi sungai dan merupakan pangkal jembatan yang berfungsi sebagai tumpuan beban jembatan. Walaupun terletak ditepi sungai, sama halnya dengan pilar jembatan, dasar sungai di sekitar *abutment* dapat mengalami gerusan yang diakibatkan oleh perubahan pola aliran, karena struktur *abutment* selalu berhubungan langsung dengan aliran sungai. Jembatan yang melintas di atas sungai akan mempengaruhi karakteristik aliran, terutama aliran balik (*backwater*) karena terhambatnya aliran air akibat *abutment* jembatan. Peningkatan arus yang melintas di bawah jembatan dan aliran turbulen yang terbentuk akibat adanya tebing sungai menghasilkan gerusan lokal (*local scouring*) yang dapat membahayakan struktur jembatan. Perubahan aliran akibat adanya *abutment* jembatan menyebabkan peningkatan arus disekitar pilar. Peningkatan arus ini berdampak pada tergerusnya sedimen ataupun material yang terendapkan di sekitar *abutment*.

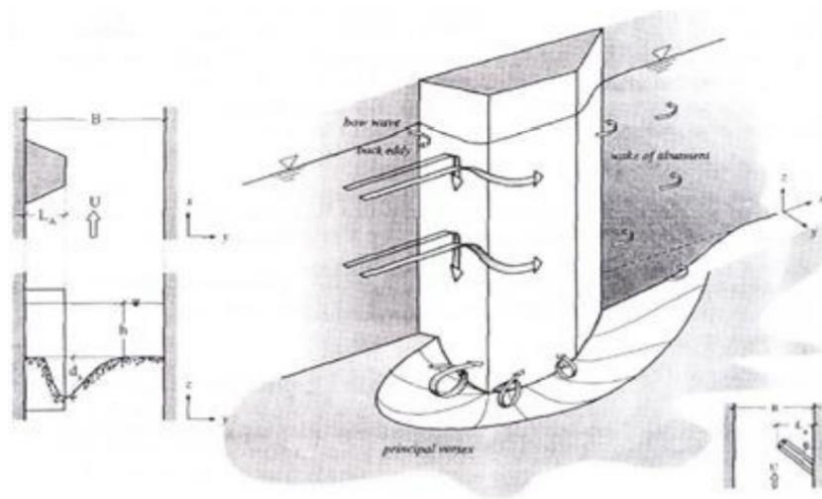


Gambar 1-2 Skema Pergerakan Partikel Sedimen (sumber: Rustiati, Nina. B. 2007)

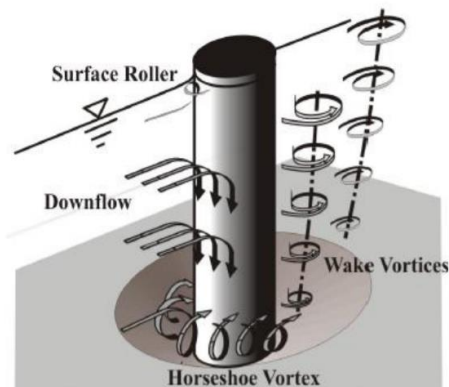
Gerusan lokal yang terjadi di sekitar *abutment* adalah kejadian turunnya dasar sungai di sekitar *abutment* karena adanya sistem pusaran (*vortex system*) yang timbul karena aliran air terhalang oleh *abutment*. Aliran yang menuju *abutment* akan membentuk aliran vertikal ke arah dasar yang selanjutnya menyebabkan terkikisnya dasar sungai di sekitar *abutment*. Mekanisme gerusan lokal ini tergantung pada perilaku pusaran tumit kuda (*horse-shoe vortex*) karena arus bawah yang terjadi di depan pilar. Saat kapasitas gerusan terjadi karena kecepatan pusaran cukup kuat dan mampu membawa partikel dasar maka proses gerusan akan terjadi.



Gambar 1-3 Hubungan antara Diameter Butiran dan Kecepatan (*sumber: Rustiati, Nina. B. 2007*)



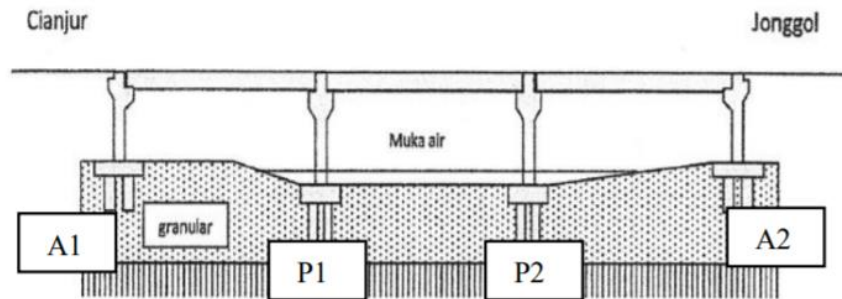
Gambar 1-4 Profil Aliran di Sekitar Abutment Jembatan (*sumber: Rustiati, Nina. B. 2007*)



Gambar 1-5 Mekanisme Gerusan Lokal pada Pilar Jembatan (*sumber: Setiati, N. R, et. al. 2019*)

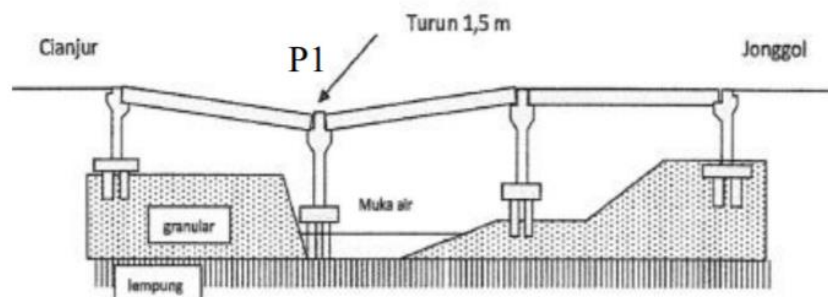
1.2.2 Runtuhnya Pilar Jembatan Cipamingkis

Jembatan Cipamingkis terletak pada koordinat LS $06^{\circ} 28,45' 41''$ dan LU $107^{\circ} 04,29' 23''$ dan merupakan salah satu jembatan yang melintas di Sungai Cipamingkis, Kabupaten Bogor. Sebelum peristiwa keruntuhan pada tahun 2017, Jembatan Cipamingkis terdiri atas tiga bentang dengan panjang bentang masing-masing 30 meter. Skema Jembatan Cipamingkis sebelum runtuh ditunjukkan dalam gambar di bawah ini.



Gambar 1-6 Sketsa Jembatan Cipamingkis Sebelum Runtuh (*sumber: Setiati, N. R, et. al. 2019*)

Berdasarkan data teknis, lebar dan tinggi kepala tiang masing-masing adalah 9,5 m dan 4 m. Struktur pilar berbentuk silinder dengan diameter sebesar 2 m. Setelah pilar P1 mengalami penurunan (Gambar 5), perbaikan dengan gelagar rangka baja dilakukan pada kepala jembatan A1 dan pilar P2. Berdasarkan Gambar 5, penyebab turunnya pilar (P1) adalah akibat gerusan lokal yang terjadi di sekitar jembatan.



Gambar 1-7 Sketsa Penurunan Pilar P1 (*sumber: Setiati, N. R, et. al. 2019*)



Gambar 1-8 Pilar Jembatan Cipamingkis mengalami Penurunan (*sumber: Setiati, N. R, et. al. 2019*)

Salah satu permasalahan yang terdapat pada jembatan ini adalah gerusan pada tanah dasar di daerah pilar jembatan. Berdasarkan beberapa hasil survei diketahui bahwa gerusan tanah akibat aliran sungai menyebabkan keruntuhan pada pilar jembatan. Keruntuhan terjadi akibat gerusan tanah yang menyebabkan pondasi kehilangan tahanan friksi.

1.3 Tahapan Perencanaan Jembatan

Data primer dan sekunder yang berkaitan dengan perencanaan jembatan harus dimiliki sebelum tahap pelaksanaan konstruksi. Data-data yang diperlukan berupa:

1) Topografi

Topografi merupakan ketinggian suatu tempat yang dihitung mulai dari permukaan air laut menggunakan peta topografi. Dengan menggunakan peta topografi elevasi tanah asli, bentang efektif jembatan dan lebar sungai bisa ditentukan, serta luas daerah aliran sungai (DAS) untuk melakukan analisis hidrologi yaitu debit rencana dan tinggi muka air banjir.

2) Curah hujan (hidrologi)

Analisis curah hujan perlu dilakukan untuk mengetahui tinggi maksimal debit air sungai sehingga tinggi banjir maksimum dapat ditentukan. Tinggi banjir maksimum digunakan untuk mencari ketinggian jembatan dari muka air banjir maksimum, tinggi *abutment*, dan panjang bentang jembatan. Untuk menentukan tinggi banjir maksimum, data hidrologi yang diperlukan adalah data curah hujan. Data tersebut akan digunakan untuk menghitung:

a. Curah hujan rata-rata

Perhitungan ini digunakan untuk memprediksi debit banjir pada periode ulang 50 tahun dengan menggunakan data curah hujan selama 11 tahun.

b. Debit banjir (Q)

Tujuan dari perhitungan debit banjir adalah untuk mengetahui besarnya debit air yang melewati sungai sehubungan dengan perencanaan periode debit banjir yaitu periode 50 tahun.

c. Tinggi muka air banjir

Penampang sungai direncanakan sesuai dengan bentuk sungai.

d. Tinggi jagaan

Menurut Peraturan Perencanaan Pembebanan Jembatan dan Jalan Raya, tinggi bebas yang disyaratkan untuk jembatan minimal satu meter di atas muka air banjir 50 tahunan. Pertimbangan ini diambil karena kondisi medan/topografi serta aliran sungai saat sedang banjir sehingga bangunan tidak menghambat aliran air.

3) Aksi lingkungan

Aksi lingkungan adalah beban-beban yang diterima oleh suatu struktur jembatan akibat pengaruh suhu, angin, banjir, gempa dan penyebab-penyebab alamiah lainnya.

4) Pemilihan lokasi jembatan

Penentuan lokasi dan layout jembatan tergantung pada kondisi lalu lintas. Secara umum, suatu jembatan berfungsi untuk melayani arus lalu-lintas dengan baik, kecuali bila terdapat kondisi khusus. Panjang-pendeknya bentang jembatan akan disesuaikan dengan lokasi jalan setempat. Penentuan bentang jembatan yang sangat layak ditentukan dari beberapa alternatif bentang pada beberapa lokasi yang telah diusulkan.

5) Aspek lalu lintas

Persyaratan transportasi meliputi kelancaran arus lalu lintas kendaraan dan pejalan kaki yang melintasi jembatan tersebut, faktor yang berpengaruh adalah lebar jembatan.

6) Aspek teknis

Persyaratan teknis yang perlu dipertimbangkan antara lain: penentuan geometri struktur, alinyemen horizontal dan vertical; pemilihan sistem utama jembatan dan posisi dek; penentuan panjang bentang optimum sesuai dengan syarat hidrolika, arsitektural dan biaya konstruksi; pemilihan elemen-elemen utama struktur atas dan struktur bawah, terutama tipe pilar dan *abutment*; detail struktur atas seperti: sandaran, parapet, penerangan dan tipe perkerasan; dan pemilihan bahan yang tepat untuk struktur jembatan berdasarkan pertimbangan struktural dan estetika.

7) Aspek estetika

Aspek estetika dalam perencanaan suatu jembatan sangat diperlukan untuk faktor ekonomi dan artistik sehingga struktur jembatan tidak hanya didasarkan pada struktural dan pemenuhan transportasi saja.

8) Layout jembatan

Setelah lokasi jembatan ditentukan, selanjutnya yang perlu dipertimbangkan adalah layout jembatan terhadap topografi setempat.

9) Penyelidikan lokasi

Setelah lokasi dan layout jembatan ditetapkan pada peta, tahap berikutnya adalah mempersiapkan tahap rancangan awal (*preliminary design*) yang mempelajari tentang keadaan lokasi jembatan terutama kondisi rencana struktur bawah pada sungai.

Contoh soal:

A preliminary hydraulic design is required for a bridge to cross a 60 m wide main channel with floodplains 150 m wide on each side when the discharge is 490 m³/s. The corresponding flow depth is 2.6 m in the main channel and, since the river has banks 1.0 m high, 1.6 m on the immediately adjoining floodplain. The diameter of the sand bed material is $D_{50} = 1.0$ mm.

Jawaban:

Lacey's surface width of an alluvial channel = $4.75Q^{1/2}$

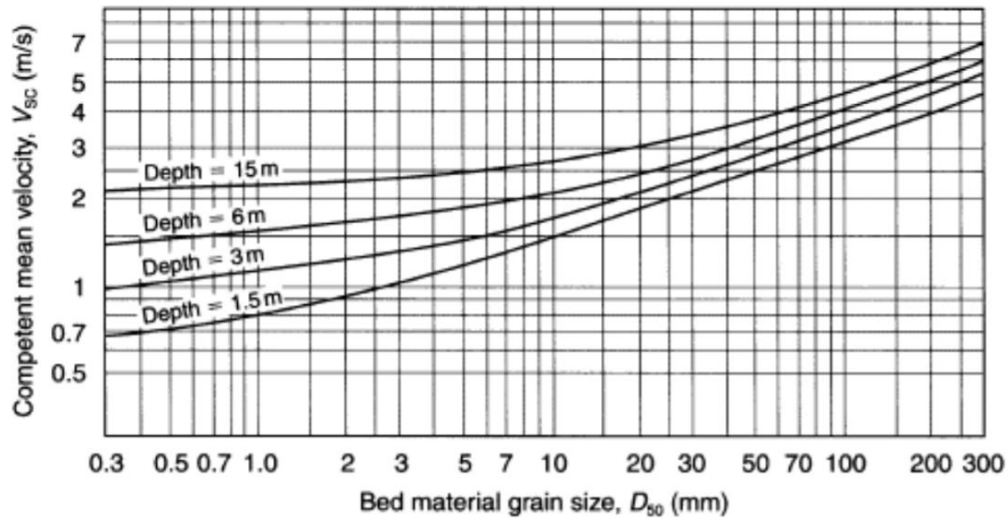
Minimum suggested trial opening width = $3.20Q^{1/2}$

Lacey (maximum waterway) width = $4.75Q^{1/2} = 4.75 \times 490 = 105$ m

approximate minimum waterway width = $3.20Q^{1/2} = 3.20 \times 490^{1/2} = 71$ m

Try an opening 80 m wide between *abutments* with three piers each 1.2 m wide at 20 m centres. This gives a net opening width $b = 76.4$ m, which allows for some contraction of the flow. If the depth (Y) is approximately 2.6 m and $b = 76.4$ m then the net cross-sectional area of flow in the opening, $a = 2.6 \times 76.4 = 199\text{m}^2$. Thus, the opening velocity $V = 490/199 = 2.5$ m/s. Now consider the potential contraction scour depth, d_{SC} . As a first iteration, with $D_{50} = 1$ mm and $Y = 2.6$ m from Fig. 1.14 the competent mean velocity (V_{SC}) is about 1.0 m/s, suggesting that the opening area will increase until $V = V_{SC}$ when $a = Q/V_{SC} = 490/1.0 = 490\text{ m}^2$ and the average depth of flow $Y = a/b = 490/76.4 = 6.4$ m. With $Y = 6.4$ m the competent mean velocity increases to about 1.6 m/s.

Second iteration: say $V = 1.35$ m/s when $a = 490/1.35 = 363$ m² giving $Y = 363/76.4 = 4.8$ m. With $D_{50} = 1$ mm both $V_{SC} = 1.35$ m/s and $Y = 4.8$ m are broadly consistent with Fig. 1.14 so assume the average contraction scour depth in the opening is about $d_{SC} = (4.8 - 2.6) = 2.2$ m. At the piers, the scour depth will be larger as a result of the locally increased velocity and vortices. Say the piers have a width $b_P = 1.2$ m, have round noses, and are aligned to the approach flow (therefore no correction for the angle of attack is needed). From Fig. 1.15 the local pier scour depth $d_{SP} = 1.5 b_P = 1.5 \times 1.2 = 1.8$ m. Adding this to the contraction scour depth gives a combined depth $d_S = 4.0$ m.



Gambar 1-9 Variation of competent mean velocity (V_{sc}) with the median diameter by weight (D_{50}) and depth of flow. The competent mean velocity is that at which the flow is just competent to move the exposed bed material at the scoured depth (sumber: Les Hamill. 1999)

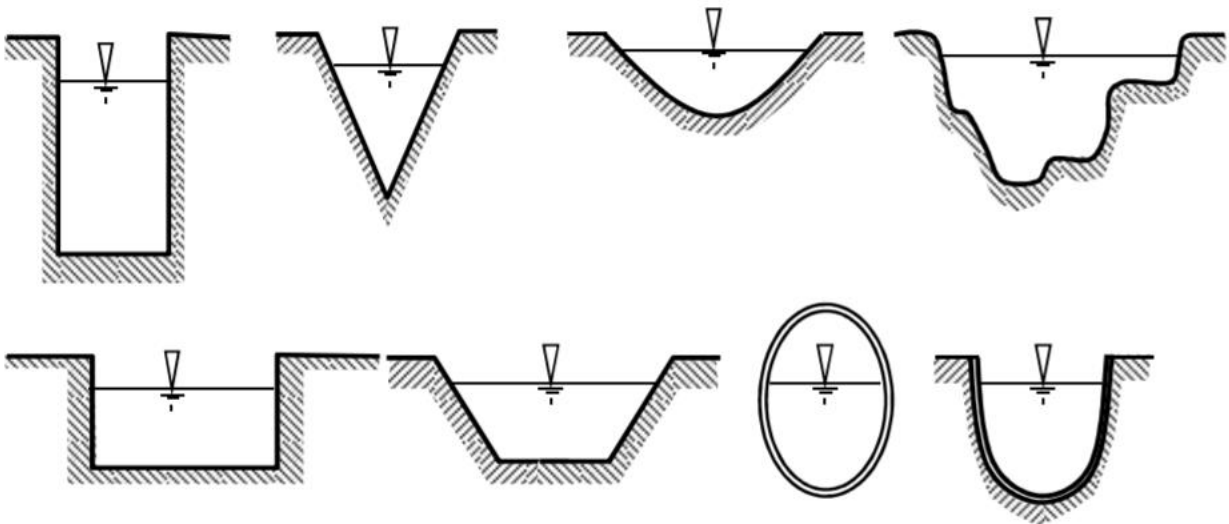
(a)	Pier shape in plan	Pier shape in profile	Suggested allowance for local scour
			$d_{SP} = 1.5 b_p$
		Ditto	Ditto
		Ditto	$d_{SP} = 2.0 b_p$
		Ditto	$d_{SP} = 1.2 b_p$
			$d_{SP} = 1.0 b_p$
	Ditto		$d_{SP} = 2.0 b_p$

Gambar 1-10 Approximate pier scour depth, d_{SP} , for various pier shapes aligned to the approach flow, where b_p is the pier width perpendicular to the flow. If the depth of flow exceeds $5b_p$ then d_{SP} should be increased by 50% (sumber: *Les Hamill, 1999*)

BAB 2. PROFIL ALIRAN AIR DENGAN ADANYA JEMBATAN

Sungai merupakan saluran terbuka yang terbentuk secara alamiah di atas permukaan bumi. Sungai tidak hanya menampung air tetapi juga mengalirkannya dari bagian hulu ke bagian hilir. Alur sungai yang terbentuk ada yang lurus, kelokan (*meander*) dan bercabang. Pada kelokan sungai umumnya terjadi permasalahan yaitu penggerusan sungai baik penggerusan pada dasar sungai maupun pada dinding sungai. Hal ini mengakibatkan keruntuhan pada dinding sungai dan dapat menyebabkan kerusakan infrastruktur yang berada di sekitar kelokan.

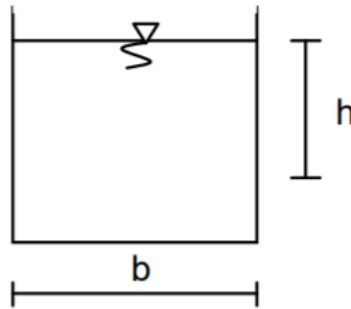
Saluran terbuka adalah saluran dengan air mengalir pada permukaan yang bebas (*free surface*) (Henderson, F.M, 1966). K.G. Ranga Raju (1986) mengklasifikasi saluran terbuka menjadi dua jenis yaitu saluran buatan (*artificial*) dan saluran alami (*natural*), bergantung pada penampangnya adalah buatan manusia atau terbentuk secara alami. Sungai dan muara adalah contoh dari saluran alami. Menurut Dr. Ir Erizal, M. Agr (2013) zat cair yang mengalir pada saluran terbuka mempunyai bidang kontak hanya pada dinding dasar saluran. Berikut ini adalah bentuk-bentuk saluran terbuka, baik saluran buatan maupun alamiah, yang umum dijumpai.



Gambar 2-1 Bentuk-Bentuk Potongan Melintang Saluran Terbuka (*sumber: Frida Amanda. 2017*)

2.1. Geometri Saluran

Harianja, J.A dan Gunawan, S menyatakan bahwa penampang saluran alam umumnya sangat tidak beraturan dan bervariasi dari bentuk menyerupai parabola sampai trapesium. Istilah penampang saluran (*channel section*) adalah tegak lurus terhadap arah aliran, sedangkan penampang vertikal saluran (*vertical channel section*) adalah penampang vertikal melalui titik terbawah atau terendah dari penampang sehingga penampang saluran mendatar selalu merupakan penampang vertikal.



Gambar 2-2 Penampang Saluran Persegi Panjang (*sumber: Harianja, J.A dan Gunawan, S. 2007*)

$$\text{Luas (A)} = b \times h$$

$$\text{Keliling basah (P)} = b + 2h$$

$$\text{Jari-jari hidrolis (R)} = \frac{bh}{b+2h}$$

Dengan b = lebar dasar saluran dan h = tinggi kedalaman air.

2.2 Klasifikasi Aliran Saluran Terbuka

Dr. Ir Erizal, M. Agr (2013) menyatakan bahwa aliran permukaan bebas dapat diklasifikasikan menjadi berbagai tipe yang bergantung pada kriteria yang digunakan. Berdasarkan perubahan kedalaman atau kecepatan yang mengikuti fungsi waktu, aliran dibedakan menjadi aliran permanen (*steady*) dan tidak permanen (*unsteady*), sedangkan berdasarkan fungsi ruang, aliran dibedakan menjadi aliran seragam (*uniform*) dan tidak seragam (*non-uniform*).

1. Aliran Permanen (*Steady*) dan Tidak Permanen (*Unsteady*)

Jika kecepatan aliran pada suatu titik tidak berubah terhadap waktu, maka alirannya disebut aliran permanen atau tunak (*steady flow*). Jika kecepatan pada suatu lokasi tertentu berubah terhadap waktu maka alirannya disebut aliran tidak permanen atau tidak tunak (*unsteady flow*). Jika bentuk gelombang berubah selama perambatannya, maka tidak mungkin mentransformasikan gerakan gelombang tersebut menjadi aliran permanen. Misalnya gelombang banjir yang merambat pada sungai alamiah tidak dapat ditransformasikan menjadi aliran permanen, karena bentuk gelombang termodifikasi dalam perjalanannya sepanjang sungai.

2. Aliran Seragam

Aliran pada saluran terbuka dikatakan seragam jika kedalaman aliran sama pada setiap penampang saluran. Suatu aliran seragam dapat bersifat tunak atau tidak tunak, tergantung pada kedalamannya yang berubah sesuai dengan perubahan waktu. Aliran seragam yang tunak (*steady uniform flow*)

merupakan jenis aliran pokok yang dibahas dalam hidrolika saluran terbuka dengan kedalaman aliran tidak berubah selama waktu tertentu yang telah diperhitungkan.

3. Aliran Laminer dan Aliran Turbulen

Menurut Dr. Ir Erizal, M. Agr (2013), jika partikel zat cair yang bergerak mengikuti alur tertentu dan aliran tampak seperti gerakan serat-serat atau lapisan-lapisan tipis yang paralel, maka alirannya disebut aliran laminar. Sebaliknya jika partikel zat cair bergerak mengikuti alur yang tidak beraturan, baik ditinjau terhadap ruang maupun waktu, maka alirannya disebut aliran turbulen.

Faktor yang menentukan keadaan aliran adalah pengaruh relatif antara gaya kekentalan (viskositas) dan gaya inersia. Jika gaya viskositas dominan, alirannya laminar, jika gaya inersia yang dominan, alirannya turbulen. Nisbah antara gaya kekentalan dan inersia dinyatakan dalam bilangan Reynold (Re), yang didefinisikan sebagai berikut (Ven Te Chow, 1992):

$$Re = \frac{V.L}{\nu}$$

Keterangan:

V = Kecepatan aliran (m/det)

L = Panjang karakteristik (m), pada saluran muka air bebas $L = R$,

R = Jari-jari hidraulik saluran,

ν = Kekentalan kinematik (m^2/det).

Pada aliran bebas dipakai kedalaman hidraulik atau jari-jari hidraulik sebagai panjang karakteristik. Kedalaman hidraulik didefinisikan sebagai luas penampang basah dibagi lebar permukaan air, sedangkan jari-jari hidraulik didefinisikan sebagai luas penampang basah dibagi keliling basah. Batas peralihan antara aliran laminar dan turbulen pada aliran bebas terjadi pada bilangan Reynold, $Re + 600$, yang dihitung berdasarkan jari-jari hidraulik sebagai panjang karakteristik.

4. Aliran Subkritis, Kritis, dan Superkritis

Aliran dikatakan kritis apabila kecepatan aliran sama dengan kecepatan gelombang gravitasi dengan amplitudo kecil. Jika kecepatan aliran lebih kecil daripada kecepatan kritis, maka alirannya disebut subkritis, dan jika kecepatan alirannya lebih besar daripada kecepatan kritis, alirannya disebut superkritis.

Parameter yang menentukan ketiga jenis aliran tersebut adalah nisbah antara gaya gravitasi dan gaya inerti yang dinyatakan dengan bilangan Froude (Fr). Untuk saluran berbentuk persegi, bilangan Froude didefinisikan sebagai berikut (Erizal, 2013):

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}}$$

Keterangan:

V = kecepatan aliran (m/det),

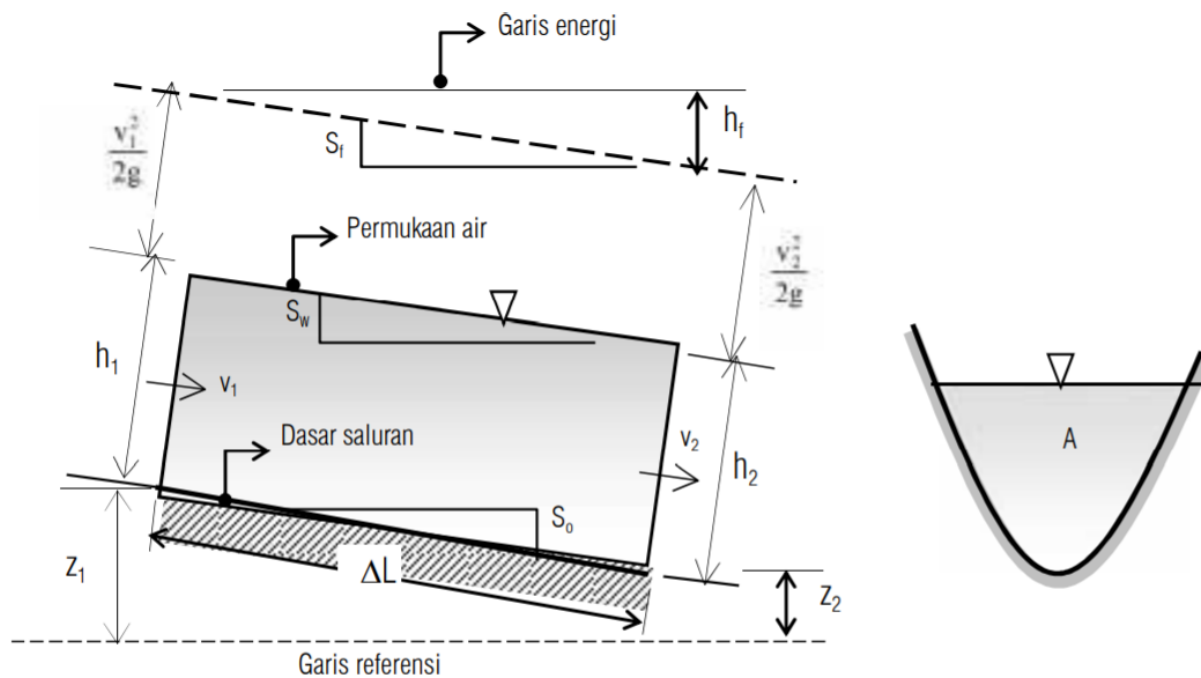
h = kedalaman aliran (m),

g = percepatan gravitasi (m/det²)

$\sqrt{g \cdot h}$ = kecepatan gelombang dangkal

2.2.1 Aliran Permanen Seragam (*steady uniform flow*)

Menurut Dr. Ir Erizal, M. Agr, aliran seragam adalah aliran yang mempunyai kecepatan konstan terhadap jarak, garis aliran lurus dan sejajar, dan distribusi tekanan adalah hidrostatis. Untuk aliran permanen berarti pula bahwa kecepatan adalah konstan terhadap waktu. Dengan kata lain, percepatan sama dengan nol, dan gaya-gaya yang bekerja pada pias air adalah dalam kondisi seimbang. Kemiringan dasar saluran (S_0), permukaan air (S_w), dan gradien energi (S_f) adalah sama. Pias aliran tetap seragam ditampilkan pada gambar berikut ini.



Gambar 2-3 Pias Aliran Tetap Seragam (sumber: Frida Amanda. 2017)

Berdasarkan Hukum Kekekalan Energi atau yang dikenal dengan Hukum Bernoulli, maka:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + hf$$

dimana:

$$p_1 = \gamma h_1 \cos\theta$$

$$p_2 = \gamma h_2 \cos\theta$$

sehingga

$$z_1 + h_1 \cos\theta + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + h_2 \cos\theta + \frac{v_2^2}{2g} + hf$$

Untuk kebanyakan saluran alamiah harga θ sangat kecil, sehingga $\gamma \cos\theta = \gamma$, dan persamaan menjadi:

$$z_1 + h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + hf$$

dan kemiringan dasar saluran, muka air, dan gradien energi berturut-turut adalah:

$$S_o = \sin\theta = \frac{(z_1 - z_2)}{\Delta L}$$

$$S_w = \frac{(z_1 + h_1) - (z_2 + h_2)}{\Delta L}$$

$$S_f = \frac{h_f}{\Delta L} = \frac{\left(z_1 + h_1 + \frac{v_1^2}{2g}\right) - \left(z_2 + h_2 + \frac{v_2^2}{2g}\right)}{\Delta L}$$

Penampang saluran alami biasanya berbentuk tidak teratur sehingga untuk debit aliran yang tetap tidak didapati garis muka air yang sejajar dengan garis dasar saluran. Untuk pemakaian praktis, jika alirannya permanen dan perubahan lebar, kedalaman air, dan arah saluran adalah kecil, maka aliran dapat dianggap seragam.

2.3 Penyempitan Saluran

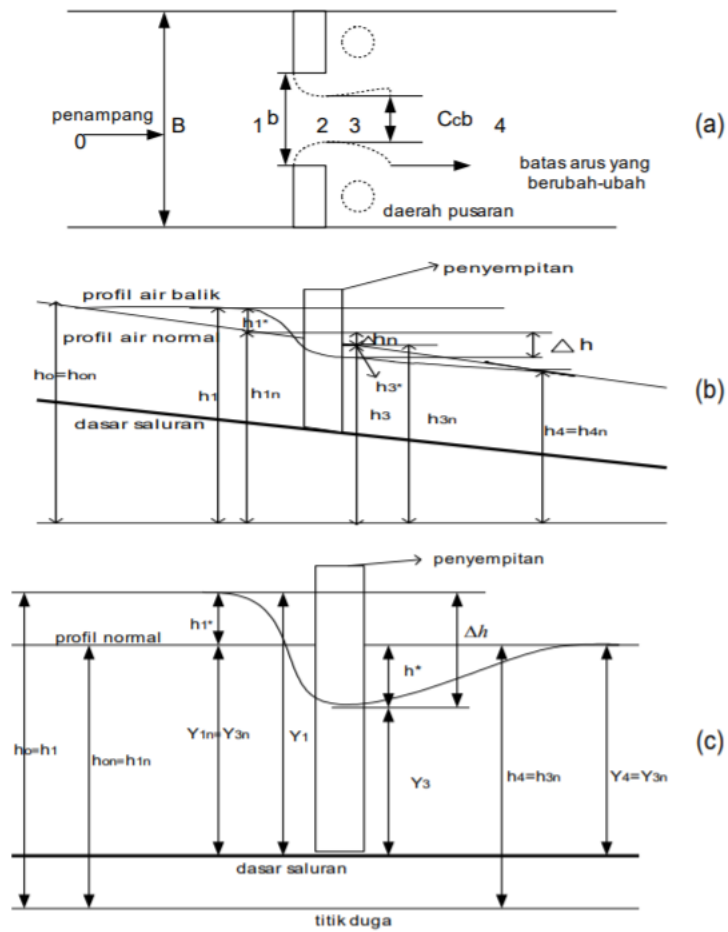
Penyempitan saluran adalah suatu fenomena yang biasa dijumpai pada saluran terbuka. Suatu penyempitan pada saluran terbuka, terdiri atas daerah penyempitan penampang lintang saluran secara mendadak. Pengaruh penyempitan tergantung pada geometri (bentuk) bagian lengkungan masuk penyempitan, kecepatan aliran dan keadaan aliran (Ven Te Chow, 1992).

Aliran yang melalui penyempitan dapat berupa aliran superkritis atau subkritis. Pada aliran subkritis, adanya penyempitan saluran akan menyebabkan terjadinya efek pembendungan yang meluas ke arah

hulu, sedangkan pada aliran superkritis hanya akan menimbulkan perubahan ketinggian permukaan air didekat penyempitan dan tidak meluas ke arah hulu. Bila kedalaman air di penyempitan lebih besar dibandingkan kedalaman kritis, maka perluasan genangan air ke arah hulu hanya terjadi pada jarak yang dekat, dan dibagian akhir efek pembendungan itu akan terjadi suatu loncatan hidrolis.

Kedalaman kritis dapat didefinisikan sebagai kedalaman air yang menyebabkan terjadinya aliran kritis. Terjadi atau tidaknya penampang kritis (penampang saat aliran dalam kondisi kritis) pada penyempitan, tergantung pada besarnya perbandingan antara energi aliran normal E_{sn} dengan energi aliran kritis E_{skr} . Pada gambar di bawah ini terlihat penyempitan yang terjadi pada saluran terbuka dengan kemiringan kecil. Pada keadaan ini timbul efek pembendungan berupa genangan air yang berawal di bagian masuk penyempitan dan berakhir pada penampang 0. Di antara titik 0 sampai 1 kecepatan aliran berubah secara perlahan-lahan. Mulai masuk bagian penyempitan pada penampang 1, kecepatan aliran mulai bertambah dan akhirnya semakin berkurang setelah keluar dari penyempitan.

Pada bagian akhir penyempitan, aliran berubah secara cepat dan ditandai dengan adanya percepatan pada arah tegak lurus dan sejajar garis arus. Pada daerah ini permukaan air turun secara drastis, dan pada arus yang berubah-ubah tersebut kecepataannya terus berkurang. Daerah antara arus yang berubah-ubah dengan bagian akhir penyempitan dipisahkan oleh suatu zona yang berupa pusaran air. Perubahan arus yang mengalir melalui penyempitan mencapai lebar minimum pada penampang 2. Setelah keluar dari penyempitan, diantara penampang 3 dan 4, aliran akan berubah sedikit demi sedikit, dan akhirnya arus yang berubah-ubah berangsur-angsur kembali menjadi aliran seragam pada penampang 4. Jika aliran pada penampang 0 sampai 4 telah konstan, maka kehilangan energi total sama dengan energi total seragam.

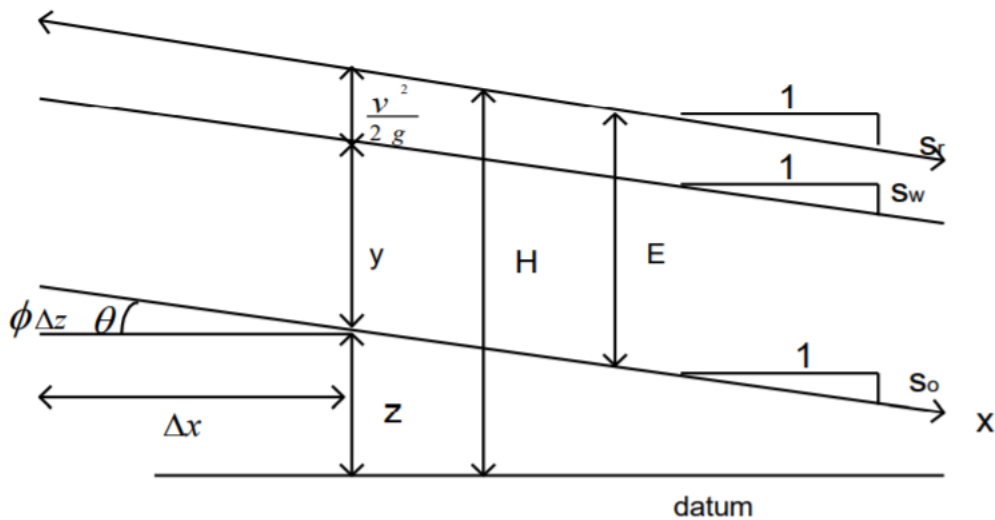


Gambar 2-4 Sketsa Aliran yang Melalui Penyempitan; (a) denah; (b) tampak tegak; (c) tampak tegak dengan asumsi kehilangan energi akibat gesekan = 0 (sumber: Harijanja, J.A dan Gunawan, S. 2007)

2.4. Energi Spesifik (*Specific Energi*)

Besarnya energi spesifik dapat dirumuskan sebagai berikut (Ven Te Chow, 1959 dalam Robert, J.K., 2002):

$$E = \frac{v^2}{2g} + h, \text{ dengan } E = \text{energi spesifik.}$$



Gambar 2-5 Parameter Energi Spesifik (sumber: Harianja, J.A dan Gunawan, S. 2007)

Dasar saluran diasumsikan mempunyai kemiringan landai atau tanpa kemiringan. Z adalah ketinggian dasar diatas garis referensi yang dipilih, h adalah kedalaman aliran, dan faktor koreksi energi (α) dimisalkan sama dengan satu. Energi spesifik aliran pada setiap penampang tertentu dihitung sebagai total energi pada penampang itu dengan menggunakan dasar saluran sebagai referensi (Rangga Raju, 1981). Persamaan energi secara umum adalah

$$H = z + h \cos\theta + \alpha \frac{v^2}{2g}$$

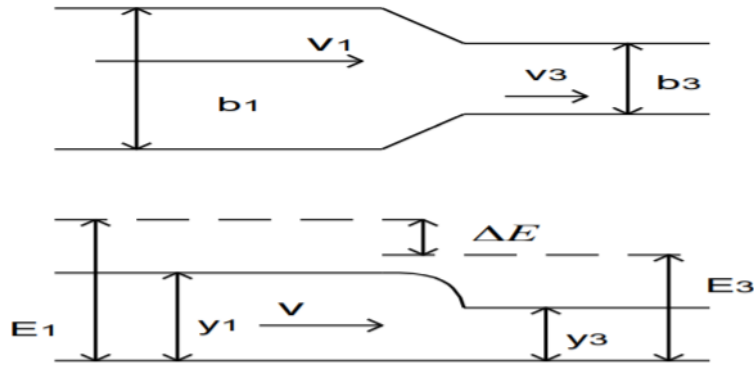
sehingga persamaan energi untuk saluran datar ($\theta = 0$), adalah

$$E = \frac{v^2}{2g} + h$$

Berhubung $Q = v \times A$, maka rumus energi spesifik menjadi

$$E = \frac{Q^2}{2gA^2} + h$$

dengan H = tinggi energi (cm), z = tinggi suatu titik terhadap bidang referensi (cm), α = koefisien energi, pada perhitungan selanjutnya $\alpha = 1$, E = energi spesifik (cm), h = kedalaman aliran (cm), v = kecepatan aliran rata-rata (cm/detik), A = luas penampang (cm²), g = percepatan gravitasi (cm/detik²), dan Q = debit (cm³/det). Perbedaan energi sebelum penyempitan dan energi setelah penyempitan dikenal sebagai kehilangan energi, yaitu $\Delta E = E_1 - E_2$ sebagaimana ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 2-6 Profil Aliran melalui Penyempitan (sumber: Harianja, J.A dan Gunawan, S. 2007)

Dari gambar di atas diperoleh persamaan besarnya kehilangan energi sebagai berikut:

$$\Delta E = y_1 + \frac{v_1^2}{2g} - y_3 - \frac{v_3^2}{2g}$$

dengan ΔE = kehilangan energi (cm), y_1 = tinggi air sebelum penyempitan (cm), y_3 = tinggi air pada penyempitan (cm), v_1 = kecepatan air sebelum penyempitan (cm/det), dan v_3 = kecepatan air pada penyempitan (cm/det). Kecepatan dapat diturunkan dari persamaan sebelumnya, sehingga persamaan di atas menjadi

$$\Delta E = y_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} - y_3 - \frac{Q^2}{2gA_3^2}$$

dengan A_1 = luas penampang titik 1 dan A_3 = luas penampang titik 3.

2.5 Kontinuitas Aliran dan Hukum Kekekalan Energi

Saluran terbuka mempunyai permukaan yang terbuka terhadap atmosfer dan air adalah suatu zat yang tak bisa dimampatkan. Sehingga ketika air mengalir melalui sungai yang tampang melintangnya tidak beraturan, aliran tersebut akan mengalami perubahan kecepatan dan kedalaman karena menyesuaikan dengan bentuk geometri sungai. Jika tidak ada air yang masuk dan meninggalkan sungai, jumlah air yang mengalir akan tetap sama dari tiap tampang melintang sungai. Karena air tidak dapat dimampatkan maka hasil perkalian kecepatan aliran dan luas tampang melintang akan tetap sama. Persamaan konservasi massanya adalah sebagai berikut

$$Q = V \times A$$

dengan:

Q = debit aliran (m^3/det)

A = luas tampang basah (m^2)

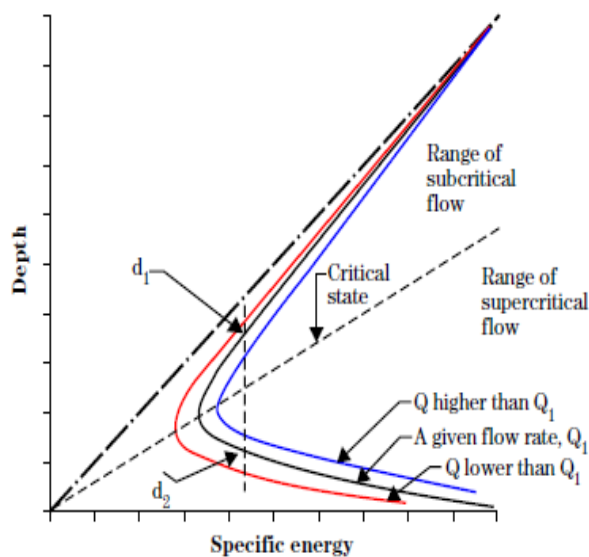
V = kecepatan rata-rata (m/det)

2.5.1 Energi

Energi adalah kemampuan yang dimiliki sebuah sistem fisik untuk bergerak melawan gaya. Energi adalah jumlah daya yang diperlukan untuk menggerakkan sebuah massa sepanjang jarak tertentu, daya = gaya dikali jarak. Dalam sistem tertutup, energi total adalah konstan dan dikenal sebagai hukum kekekalan energi.

Energi dalam air mengalir terdiri atas beberapa komponen yang disebut *head* dan digambarkan sebagai jarak vertikal, yaitu:

1. Energi potensial atau *pressure head* yang berhubungan dengan massa dan gaya gravitasi bumi.
2. Energi kinetik yang berhubungan dengan pergerakan air dan disebut sebagai *velocity head*.



Gambar 2-7 Energi Spesifik (sumber: K. M. Arsyad. 2017)

2.5.2 Kekekalan Energi

Menurut rumus Bernoulli: $z_1 + y_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_L$

Rumus di atas menggambarkan hubungan energi antara 2 tampang melintang (1 dan 2) dengan

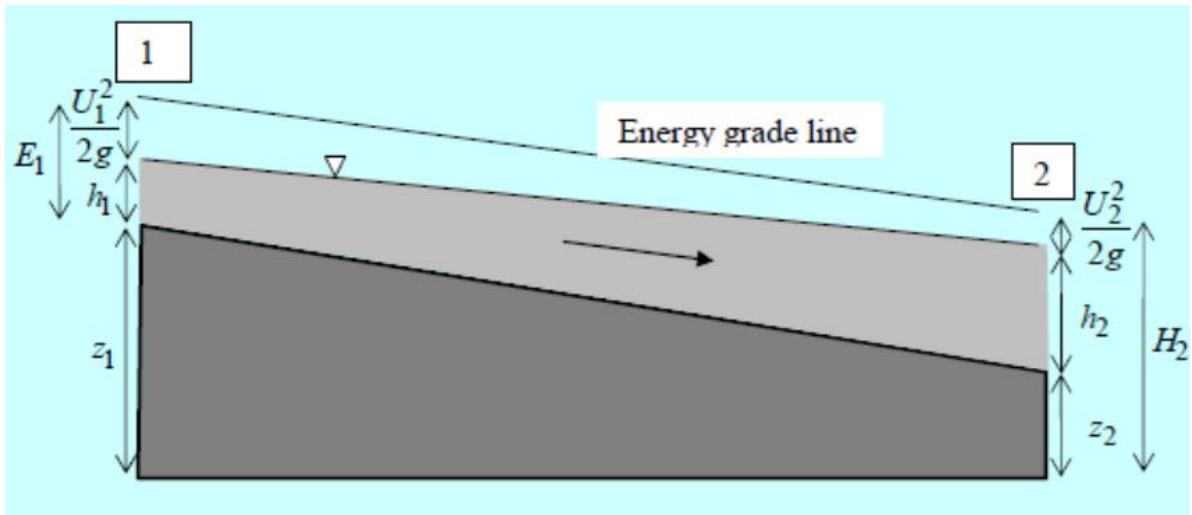
y = energi potensial

v = energi kinetik

z = energi potensial dari datum tegak lurus terhadap arah gravitasi

h_L = kehilangan head (head loss) diantara penampang 1 dan 2

Head loss adalah energi yang diperlukan untuk melawan gesekan tebing dan dasar sungai, turbulensi, dan angkutan sedimen.

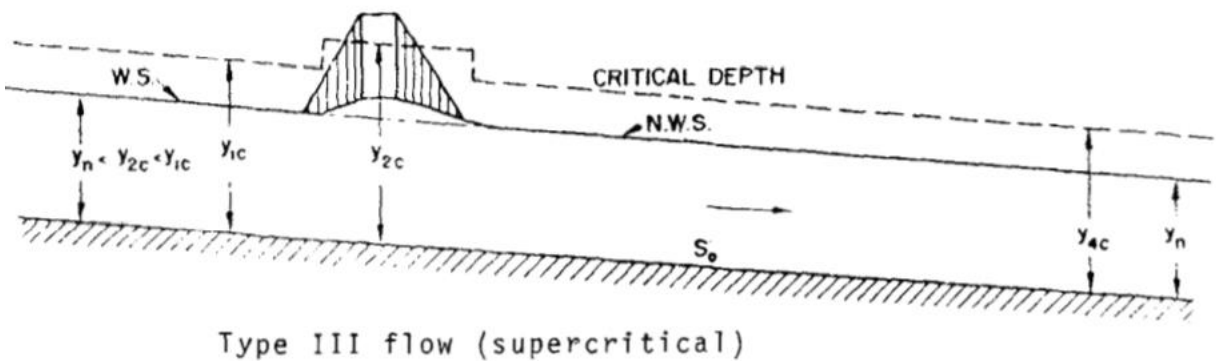
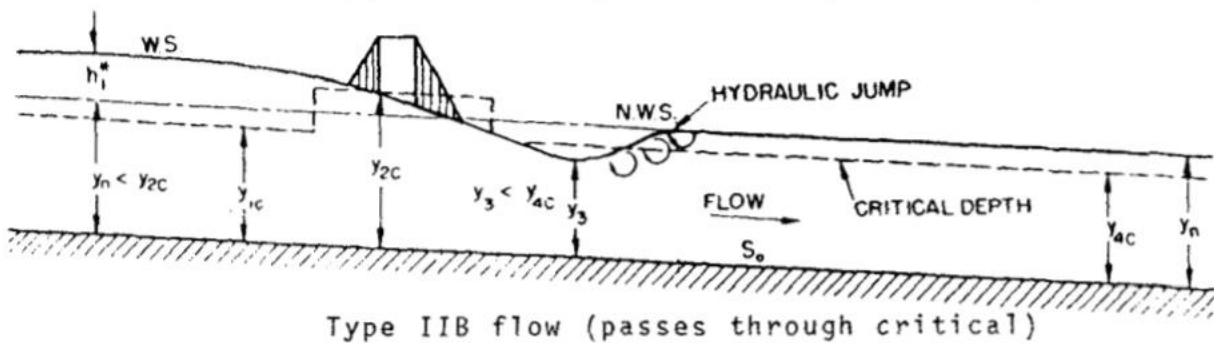
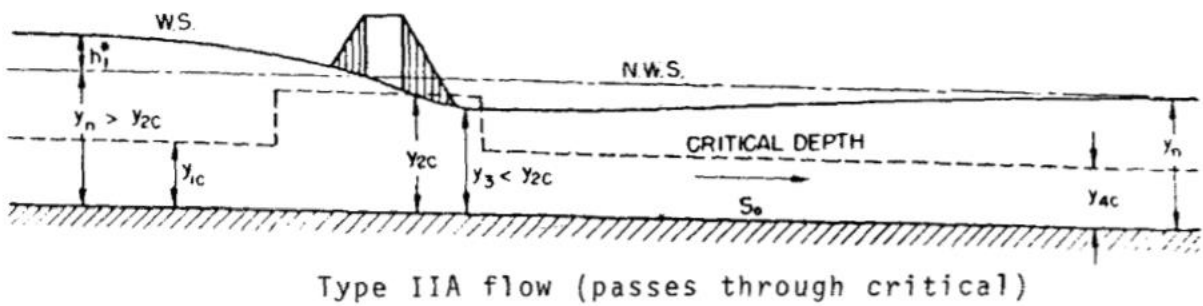
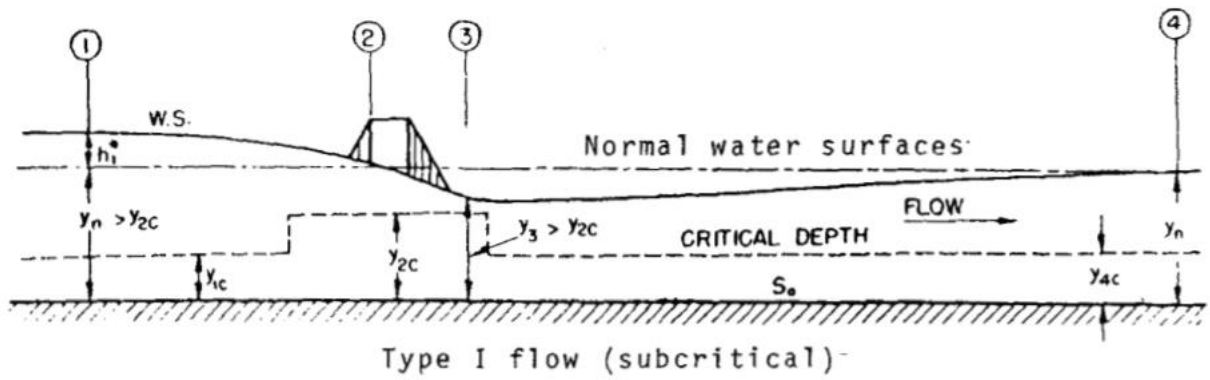


Gambar 2-8 Konservasi Energi (sumber: K. M. Arsyad. 2017)

2.6 Profil Muka Air

Terdapat tiga tipe aliran air yang melewati bukaan jembatan. Profil muka air yang melewati bukaan jembatan digambarkan seperti di bawah ini dan berikut penjelasannya:

- 1) Jika muka air berada di atas kedalaman kritis dan tiap ruas aliran subkritis (aliran tipe 1). Kondisi ini umum dijumpai di lapangan dan proses perhitungan pun umumnya mengikuti tipe ini.
- 2) Aliran dapat melewati kedalaman kritis pada penyempitan. Pada kondisi ini, kedalaman air di hulu tidak dipengaruhi oleh kondisi di hilir. Jika aliran air melewati kedalaman kritis namun tidak berada di bawah kedalaman kritis pada bagian hilirnya, maka hal ini mengacu pada aliran tipe IIA. Jika aliran air berada di bawah kedalaman kritis pada bagian hilirnya, maka hal ini mengacu pada aliran tipe IIB. Pada aliran tipe ini, loncatan hidrolik akan terjadi di bawah penyempitan jika aliran pada bagian hilir berada di atas kedalaman kritis.
- 3) Jika aliran air normal pada saluran adalah superkritis, ketinggian air pada penyempitan akan bertambah seperti ilustrasi pada gambar di bawah. Gerakan ombak pada permukaan air akan terjadi dan gelombang akan timbul di bagian hulu dan hilir saluran. Tidak akan terjadi *backwater* pada aliran tipe ini.



Gambar 2-9 Profil Aliran Melewati Penyempitan (sumber: [https://doi.org/10.1016/S0167-5648\(08\)70443-X](https://doi.org/10.1016/S0167-5648(08)70443-X))

Efek *backwater* yang disebabkan oleh penyempitan dapat dilihat dari pendekatan hukum kekekalan energi. Analisis di bawah ini dilakukan dengan asumsi saluran air lurus dengan kemiringan seragam dan jembatan berada searah dengan aliran air, aliran air permanen dan subkritis. Head loss yang disebabkan oleh penyempitan (h_b) dengan persamaan $h_b = K \alpha_2 v_2^2 / 2g$ v_2 adalah kecepatan rata-rata pada poin 2 (penyempitan) untuk ketinggian air normal di sungai dan α adalah koefisien energi yang

dipengaruhi oleh q_v : $\alpha = \frac{\sum q_i v_i^2}{Q V^2}$, Q adalah total debit air keluar dan V adalah kecepatan rata-rata air yang melewati saluran. Sehingga

$$h_b = \frac{K \alpha_2 v_2^2}{2g} + \alpha_1 \left\{ \left(\frac{A_2}{A_4} \right)^2 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right\} \frac{v_2^2}{2g}$$

Poin 1 dan 4 adalah sama, $\alpha_1 = \alpha_4$ dan kontinuitas $A_1 v_1 = A_2 v_2 = A_4 v_4$. Sehingga

$$h_b = \frac{K \alpha_2 v_2^2}{2g} + \alpha_1 \left\{ \left(\frac{A_2}{A_4} \right)^2 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right\} \frac{v_2^2}{2g}$$

Harus diperhatikan bahwa $y_1 - y_4$ bukan merupakan perbedaan pada ketinggian air; tetapi merepresentasikan *backwater* pada bagian hulu jembatan. Selain itu, akan timbul *head loss* akibat gesekan yang disebabkan oleh aliran air normal. *Backwater head loss* juga dipengaruhi oleh:

- Jumlah, ukuran, bentuk, dan arah pilar pada penyempitan.
- Faktor *eccentricity*, e , jembatan.
- Pembentukan sudut jembatan terhadap arah aliran sungai.

2.7 Studi Kasus

Dalam menghadapi kegagalan jembatan, diperlukan pemahaman menyeluruh mengenai morfologi sungai maupun Daerah Aliran Sungai (DAS) dan profil alirannya sebelum mempertimbangkan solusi penggantian jembatan menyeluruh atau memperbaiki jembatan maupun kondisi sungai dan daerah alirannya.

1. Jembatan Bahodopi, Provinsi Sulawesi Tengah

Jembatan Bahodopi terletak di Sulawesi Tengah dan merupakan salah satu jembatan di Jalur Trans Sulawesi, yang rusak akibat banjir bandang tahun 2019. Jembatan dibangun di ruas bagian tengah Sungai Bahodopi dengan kecenderungan morfologi berliku (*meander*). Sungai di hulu jembatan terus berkembang dominan ke arah tikungan luar sehingga aliran sungai menyusur dan menggerus jalan pendekat jembatan. Aliran utama sungai masuk hampir sejajar ke bukaan jembatan (gambar di bawah). Kondisi yang tidak baik ini jauh berbeda dengan kondisi saat jembatan dibangun, yang dibiarkan tanpa pemeliharaan. Saat debit aliran sungai diperkirakan sebesar $Q_{25\text{tahun}}$ datang, aliran menggerus jalan pendekat dan mengakibatkan gerusan lokal di sekitar pilar tengah jembatan. Gerusan-gerusan ini mengakibatkan jembatan rusak berat. Pemeliharaan jembatan yang tidak memadai adalah penyebab utama kerusakan. Jika alur sungai di bagian hulu sempat diperbaiki dengan jalan membuat alur pandu (*pilot channel*), diperkirakan jembatan dan jalan pendekat dapat diselamatkan.



Gambar 2-10 Lokasi Jembatan Bahodopi (sumber: Moerwanto, A.S dan Zulfan, J. 2020)

2. Jembatan Dampala, Provinsi Sulawesi Tengah

Jembatan Dampala yang terletak di Jalur Trans Sulawesi di Sulawesi Tengah mengalami nasib yang hampir sama dengan Jembatan Bahodopi. Jembatan dibangun pada ruas sungai yang memiliki kecenderungan berjaln (*braided*) sehingga alur sungai berpindah-pindah sesaat setelah terjadi banjir. Kondisi ini diperburuk oleh aktivitas penambangan di bagian hulu sungai yang mengakibatkan kenaikan dasar sungai (*agradasi*). Saat banjir di akhir tahun 2019, dengan intensitas hujan wilayah R₂₅tahun, bukaan sungai tidak mencukupi dan aliran berpindah menerjang jalan-jalan pendekat di kiri dan di kanan jembatan, akibat bukaan jembatan tersumbat oleh batang-batang kayu (*floating debris*) yang hanyut terbawa aliran sungai. Kerusakan Jembatan Dampala dapat dilihat pada gambar di bawah ini. Karena tipe sungai termasuk tipe berjaln (*braided*), panjang jembatan pengganti sebaiknya cukup didesain dengan memperhatikan lebar alur dan dilengkapi dengan struktur pengiring di udik dan di hilir bangunan. Selanjutnya, karena dasar sungai terus naik (*agradasi*) serta membawa *floating debris* dan *traffic* makin rendah, pilihan *causeway bridge* dapat menjadi pilihan yang baik sebagai bangunan pengganti. Alternatif lain adalah tipe jembatan biasa, tetapi pada ruas sungai di bagian hulu jembatan harus dibangun bangunan pengendali dasar sungai (*check-dam*).



Gambar 2-11 Lokasi Jembatan Dampala (*sumber: Moerwanto, A.S dan Zulfan, J. 2020*)

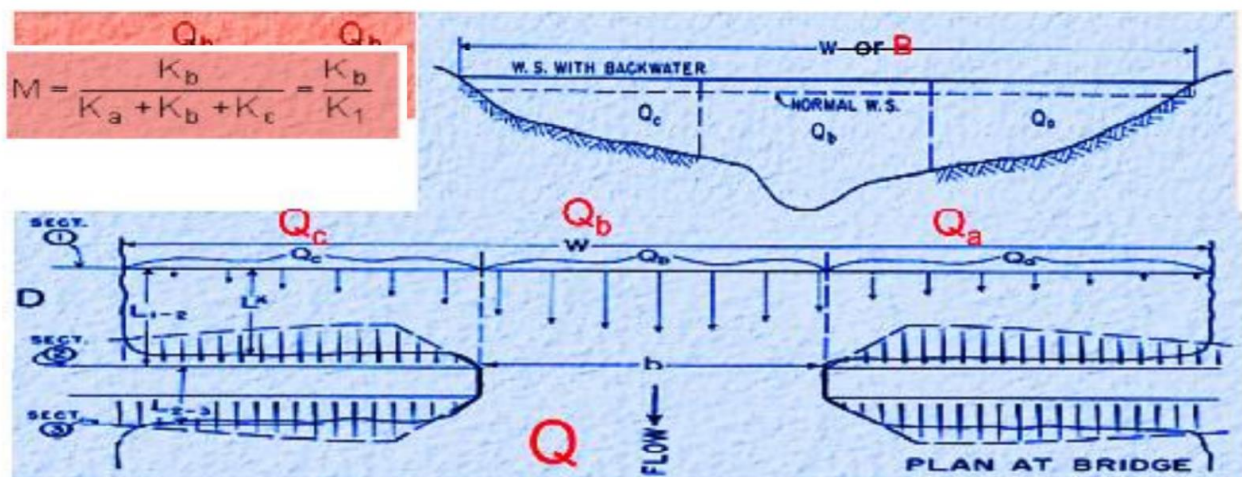
- Degradasi diartikan sebagai penurunan dasar sungai jarak jauh. Degradasi dapat terjadi di hulu sungai atau hilir sungai atau keduanya. Contoh yang paling umum dari degradasi hilir sungai adalah dam yang menangkap angkutan sedimen dan melepaskan air jernih. Degradasi di hulu sungai terjadi ketika air di hilir sungai menurun; seperti menurunnya permukaan danau, penambangan lokal material dasar, dan karena proses terjadinya degradasi di hulu lebih cepat dibandingkan dengan di bagian hilir.
- Agradasi terjadi ketika elevasi dasar sungai bertambah tinggi. Agradasi dasar sungai sering dihubungkan dengan suplai sedimen yang berlebih. Agradasi dapat menjadi masalah hilir serius akibat dari struktur pengalih air yang efektif menangkap sedimen. Kemudian muatan sedimen dibawa dari hulu oleh aliran yang tereduksi. Agradasi dan degradasi mirip seperti jungkat-jungkit; pada satu sisi adalah ukuran butiran sebagai lengan momen dan beratnya sebagai muatan sedimen, sedangkan di sisi lainnya adalah kemiringan dari sungai dan kecepatan aliran. Jika aliran mendominasi maka sungai akan terdegradasi dan akan teragradasi jika muatan sedimen mendominasi.

BAB 3. FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI PERFORMA HIDROLIKA SUATU JEMBATAN

Bab ini menjelaskan tentang faktor-faktor utama yang mempengaruhi performa hidrolika jembatan. Variabel yang disebutkan pada bab ini berkaitan dengan geometri struktur jembatan yang dikombinasikan dengan tipe aliran pada jembatan (disebutkan dalam Bab 2) akan memberikan karakteristik hidrolika unik pada tiap jembatan. Berikut ini beberapa faktor yang mempengaruhi performa hidrolika suatu jembatan.

3.1 Rasio Bukaannya Jembatan (M)

Rasio bukaan jembatan (M) merupakan perbandingan antara aliran yang dapat melewati penyempitan jembatan dengan total aliran sungai. Pengangkutan aliran setara dengan aliran air yang melewati jembatan dan diasumsikan seluruh subsektor memiliki kemiringan sama, maka M dapat dinyatakan sebagai:



Gambar 3-1 Rasio Bukaannya Jembatan (sumber: <http://196.189.45.87>>culvert and bridge material.pdf)

Jika pada sektor 1 diasumsikan bahwa kedalaman air normal (Y_N) dan kecepatan rata-rata aliran (V_N) adalah konstan pada lebar saluran total,

Q_b = aliran yang termasuk bagian saluran yang melalui bukaan jembatan pada sektor 1

Q_a, Q_c = aliran yang termasuk pada dataran banjir yang terhambat oleh tanggul

$Q = Q_a + Q_b + Q_c$ = total aliran air sungai

K_b = pengangkutan aliran yang melewati panjang jembatan pada sektor 1

K_a, K_c = pengangkutan aliran yang termasuk pada dataran banjir yang terhambat oleh tanggul

K_1 = total pengangkutan aliran pada sektor 1

$$M = \frac{b}{B}$$

B = lebar saluran, b = lebar penyempitan

3.2 Perbandingan Panjang Jalan Air dan Lebar Bukaannya, L/B

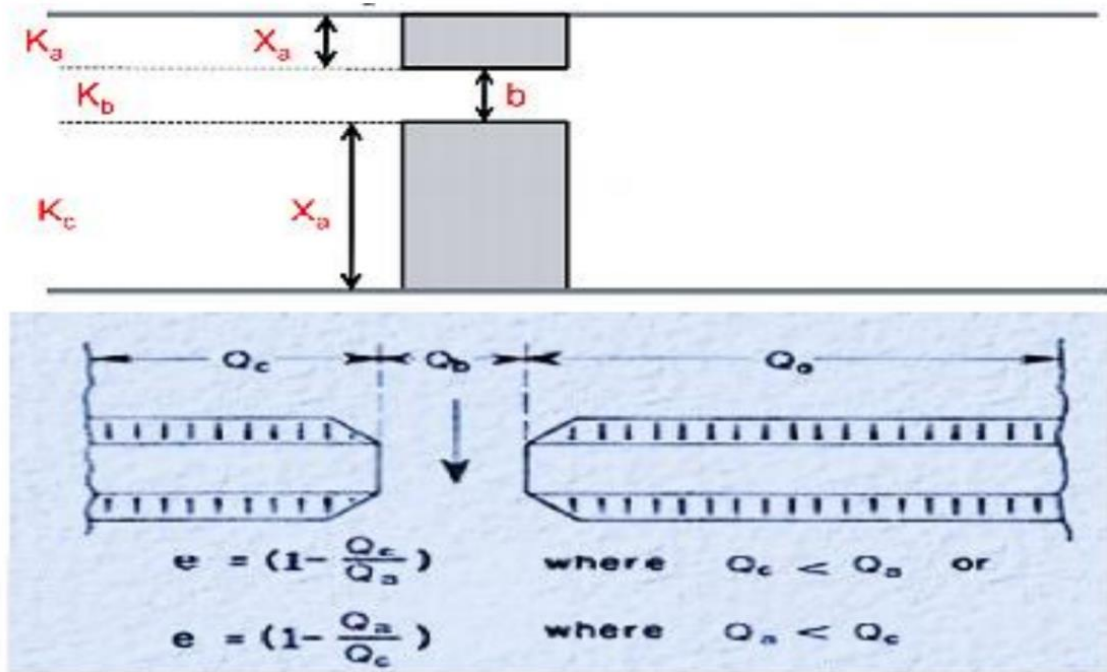
Secara umum, jalan air yang panjang lebih efisien dibandingkan dengan yang pendek, sehingga panjang jalan air merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi performa hidrolika suatu jembatan. Hal ini ditunjukkan melalui perbandingan (L/b), yaitu perbandingan panjang jalan air pada bagian hulu dan hilir yang menghadap penyempitan, L, dengan lebar atau jarak bukaan jembatan, b.



Gambar 3-2 Rasio L/b (sumber: <http://196.189.45.87>>culvert and bridge material.pdf)

3.3 Eksentrisitas, (e)

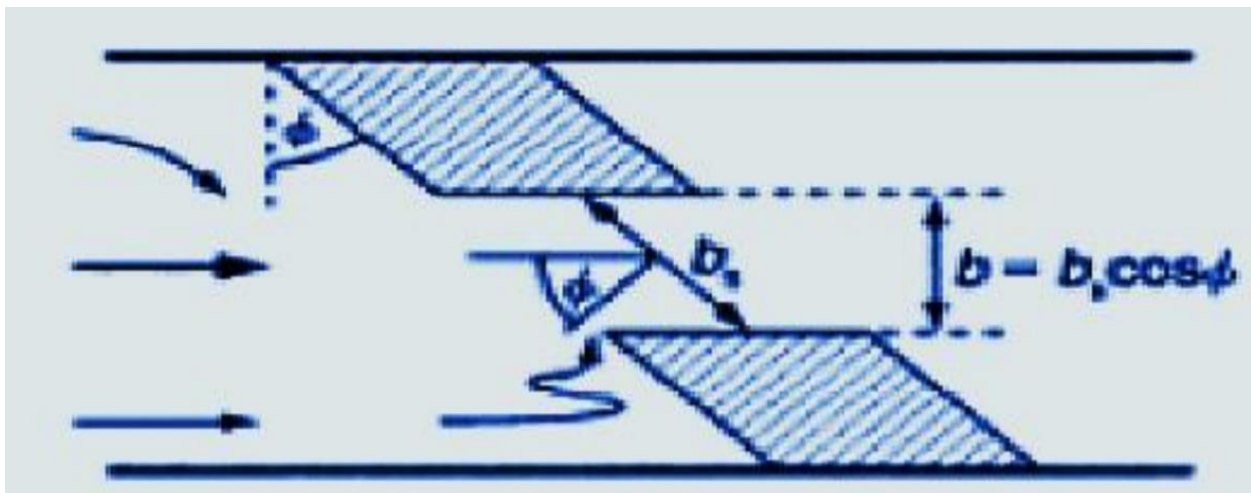
Kondisi eksentris terjadi ketika saluran utama dan jembatan tidak berada di tengah dataran banjir. Jika bukaan jembatan tidak terletak secara eksentris pada sungai, seperti ditunjukkan pada gambar di bawah ini, maka hal ini akan mempengaruhi aliran yang melewati penyempitan.



Gambar 3-3 Eksentrisitas (sumber: <http://196.189.45.87>>culvert and bridge material.pdf)

3.4 Skew (ϕ)

Skew (sudut) merupakan arah aliran air akibat jalan air yang tidak membentuk sudut 90° pada arah aliran air normal saat *flood stage*. Definisi *skew* ditunjukkan pada gambar di bawah ini. Pada gambar ini, garis tengah longitudinal jembatan dan tanggulnya berada pada sudut ϕ terhadap tebing sungai dan arah aliran, walaupun bukaan jembatan searah dengan aliran air. Untuk jalan air normal tegak lurus, $\phi = 0$.



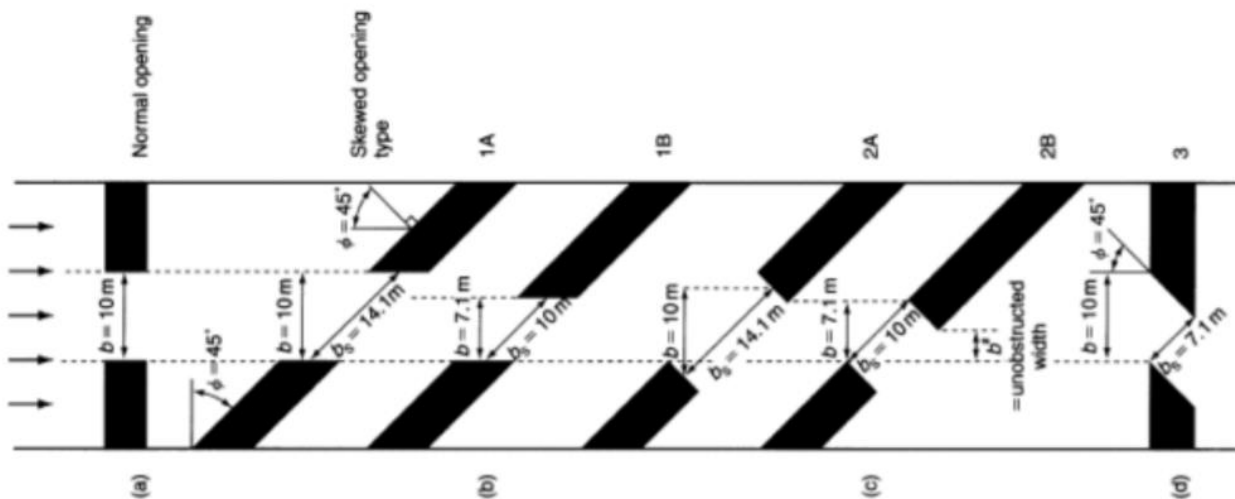
Gambar 3-4 *Skew* (sumber: <http://196.189.45.87>>culvert and bridge material.pdf)

Terdapat dua tipe *skew* terhadap jalan air normal:

Jalan air normal: letak tanggul tegak lurus terhadap aliran, jalan air paralel terhadap aliran.

Skew 1: letak tanggul membentuk sudut terhadap aliran, jalan air paralel terhadap aliran.

Skew 2: letak tanggul membentuk sudut terhadap aliran, jalan air membentuk sudut terhadap aliran.



Gambar 3-5 Perbandingan antara Jalan Air Normal dan Bersudut; Tipe *Skew* maupun Sudutnya (ϕ) (sumber: *Les Hamill.1999*)

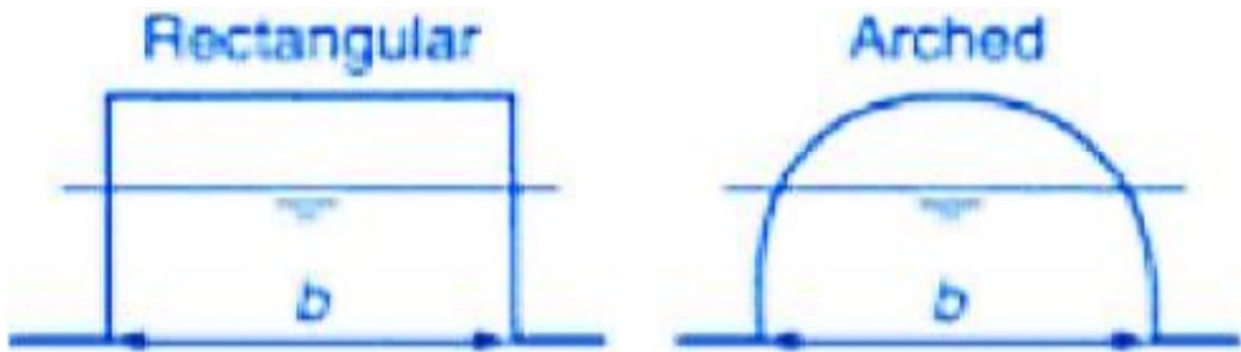
3.5 Kedalaman Aliran (Y)

Untuk air yang keluar melalui jembatan, alirannya dapat terbentuk menjadi berbagai jangkauan kedalaman yang bergantung pada kemiringan dan geometri sungai; dan aliran seragam atau tidak seragam. Nilai dari variabel seperti bilangan Froude (Fr), pengangkutan aliran (K), dan rasio bukaan jembatan (M) merupakan fungsi dari kedalaman.

Selain itu, kedalaman aliran relatif terhadap tinggi bukaan jembatan dapat mempengaruhi tipe aliran air pada jembatan dan performa hidrolika struktur jembatan. Hal ini dapat menentukan jalan air akan tenggelam atau tidak pada saat banjir terjadi. Sebagai contoh, jika nilai Y_N pada saluran yang tidak mengalami penyempitan adalah sama dengan tinggi bukaan jembatan (Z), maka kemungkinan jalan air akan terendam saat banjir terjadi.

3.6 Bentuk Bukaan Jalan Air

Bentuk dari bukaan jalan air akan mempengaruhi performa hidrolika jembatan. Sebagai contoh, bukaan jalan air berbentuk persegi panjang dengan lebar dua kali tingginya ($b = 2Z$) memiliki area penampang melintang lebih besar 27% dibandingkan bukaan jalan air dengan besaran serupa yang berbentuk melengkung setengah lingkaran. Hal ini berarti bukaan jalan air berbentuk persegi panjang akan memiliki aliran air keluar yang lebih besar dengan *afflux* yang lebih kecil dibandingkan dengan bukaan berbentuk melengkung dengan besaran yang sama.



Gambar 3-6 Bentuk Jalan Air (sumber: <http://196.189.45.87>>culvert and bridge material.pdf)

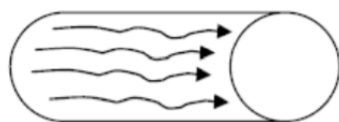
3.7 Bilangan Froude (Fr), Aliran Subkritis dan Superkritis

Pada saluran terbuka, aliran Froude juga mempengaruhi aliran air keluar yang melalui bukaan jembatan. Sifat aliran pada saluran terbuka umumnya menggunakan parameter yang berdasar pada perubahan kedalaman aliran dengan fungsi waktu dan ruang. Aliran dibedakan menjadi aliran tunak (*steady*) dan tak tunak (*unsteady*). Berdasarkan fungsi ruang, aliran dibedakan menjadi aliran seragam (*uniform*) dan tidak seragam (*non-uniform*). Pengelompokan aliran berdasarkan gaya kekentalan (*viscous forces*) dijabarkan oleh Reynolds (R_e),

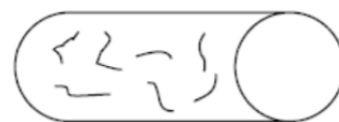
$$R_e = \frac{\rho \frac{U^2}{L}}{\mu \frac{U}{L^2}} = \frac{UL}{\nu}$$

Dengan: $\rho \frac{U^2}{L}$ = gaya enersia, $\mu \frac{U}{L^2}$ = gaya geser terhadap dasar.

Menurut Chow (1989), nilai R_e untuk saluran terbuka, $R_e \leq 500$ disebut aliran berlapis (*laminar flow*) dan $R_e \geq 2000$ disebut aliran bergolak (*turbulent flow*).



Aliran laminar



Aliran turbulen

Gambar 3-7 Aliran Laminar dan Turbulen (sumber: www.emodul.untad.ac.id>reksun-mod5.pdf)

Pengelompokan aliran berdasarkan gaya gravitasi dijabarkan Froude (F_r) dengan suatu bilangan tak berdimensi

$$F_r = \frac{u}{\sqrt{gD}}$$

Dengan: u = kecepatan rata-rata aliran (m/detik), g = gaya gravitasi (m/detik²), D = kedalaman maksimum aliran (m)

Bila $F_r < 1$, artinya $u < \sqrt{gD}$ = aliran sub kritis

Bila $F_r > 1$, artinya $u > \sqrt{gD}$ = aliran super kritis

Bila $F_r = 1$, artinya $u = \sqrt{gD}$ = aliran kritis

Nilai u diperoleh dengan rumus:

$$u = \frac{Q}{A}$$

Dengan: Q = debit aliran ($m^3/detik$), A = luas saluran (m^2)

Mengacu pada batasan untuk saluran terbuka menurut Chow (1989), dapat disimpulkan bahwa hubungan antara aliran berdasarkan kekentalan dan aliran berdasarkan gaya gravitasi (R_e dan F_r) untuk saluran terbuka dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 3.2 Pengelompokan Aliran Berdasarkan Bilangan Froude dan Reynolds pada Saluran Terbuka

No.	Pengelompokan	Bilangan Froude (F_r)	Bilangan Reynolds (R_e)
1	Aliran subkritis-berlapis	< 1	< 500
2	Aliran superkritis-berlapis	> 1	< 500
3	Aliran subkritis-transisi	< 1	$500 < R_e < 2000$
4	Aliran superkritis-transisi	> 1	$500 < R_e < 2000$
5	Aliran kritis	$= 1$	Bebas
6	Aliran subkritis-bergolak	< 1	> 2000
7	Aliran superkritis-bergolak	> 1	> 2000

Pada aliran terbuka berlaku dua persamaan yaitu persamaan umum dari hukum kontinuitas dan hukum momentum konservatif:

$$\text{Hukum kontinuitas: } \frac{\partial v y}{\partial x} = 0$$

$$\text{Hukum momentum konservatif: } v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} = g (S_o - S_f)$$

Dari persamaan hukum kontinuitas dapat dikatakan bahwa debit aliran konstan. Sedangkan dari persamaan hukum momentum konservatif, aliran pada saluran terbuka salah satunya terdiri dari aliran tidak seragam tunak (*unsteady uniform flow*) yang terbagi menjadi aliran berubah lambat laun (*steady gradually varied flow*). Aliran berubah lambat laun adalah dasar untuk analisis aliran balik (*back water*) pada pembendungan sungai yang dihitung menggunakan bilangan Froude. Aliran ini adalah aliran dengan debit konstan (*steady*) namun kedalaman y bervariasi sepanjang sumbu x .

Untuk kondisi lebar saluran/sungai konstan persamaan kontinuitas dan persamaan momentumnya, yaitu:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = 0 \text{ dan } v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} = g (S_o - S_f)$$

Dari persamaan kontinuitas maka debit konstan, sedangkan dari persamaan momentum dalam fungsi energi spesifik E dan fungsi bilangan Froude kita dapat menyusun lagi menjadi

$$\frac{dE}{dx} = S_o - S_f$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_o - S_f}{1 - F_r^2}$$

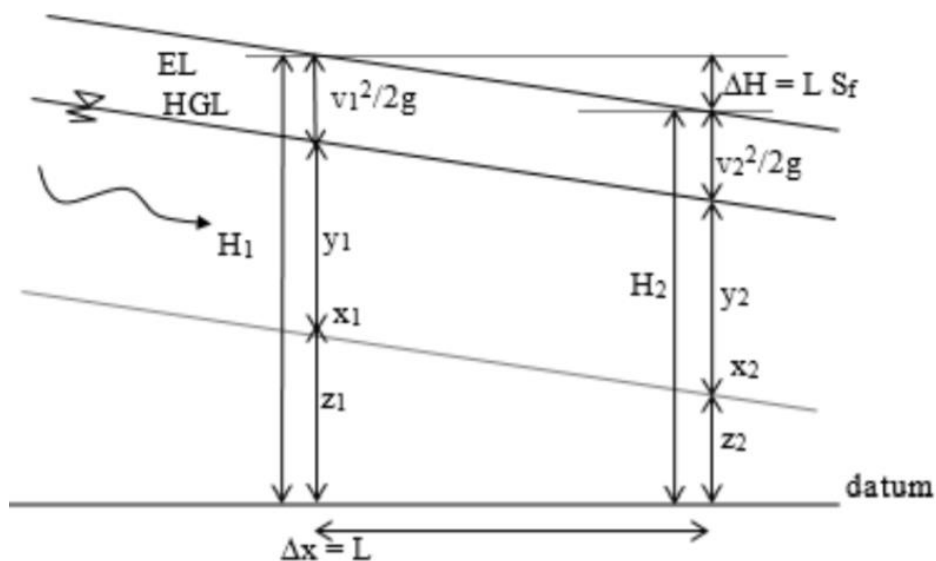
Bila di dalam bentuk total energi H, persamaan momentum ditulis

$$\frac{v \partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g \left(-\frac{\partial z}{\partial x} - S_f \right) = 0, \text{ atau}$$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{v^2}{2g} + y + z \right) = - S_f$$

$$\frac{dH}{dx} = - S_f \text{ atau } dH = - S_f dx$$

Persamaan $dH = - S_f dx$ menunjukkan bahwa aliran dari x_1 ke x_2 menyebabkan kehilangan total energi sebesar $\Delta H = LS_f$ seperti ditunjukkan dalam gambar berikut ini. Persamaan untuk kondisi ini adalah $H_1 = H_2 + LS_f$



Gambar 3-8 Kehilangan Energi dari x_1 ke x_2 (sumber: K. M. Arsyad.2017)

3.8 Gerusan pada Jembatan

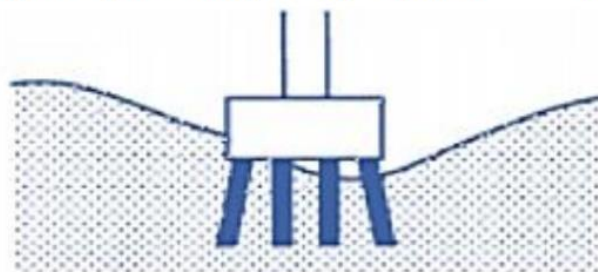
Gerusan adalah proses hilangnya material sedimen dari dasar dan tebing sungai yang diakibatkan oleh daya pengerosi yang dimiliki oleh aliran air. Penyebab kegagalan jembatan yang paling umum adalah sejumlah besar material dasar sungai yang tergerus dan menyebabkan degradasi dasar sungai di sekitar fondasi jembatan. Kegagalan ini disebabkan oleh:

- Kurangnya pengetahuan mengenai fenomena gerusan pada saat konstruksi jembatan dilaksanakan.
- Kurangnya data dan pengetahuan mengenai banjir rencana.

Laju gerusan umumnya tergantung pada:

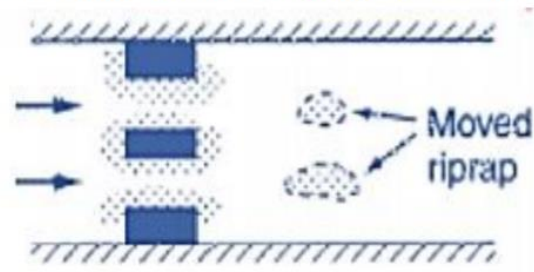
- Kekuatan aliran air, resistensi material, dan keseimbangan sedimen masuk/keluar (*equilibrium scour*).
- Material yang tertumpuk akibat kegagalan riprap atau tebing di sekitar sungai.
- Erosi dan kegagalan pada tanggul dengan aliran yang terbentuk pada dua sisi *abutment*.

(a) Pier piles and pile cap exposed

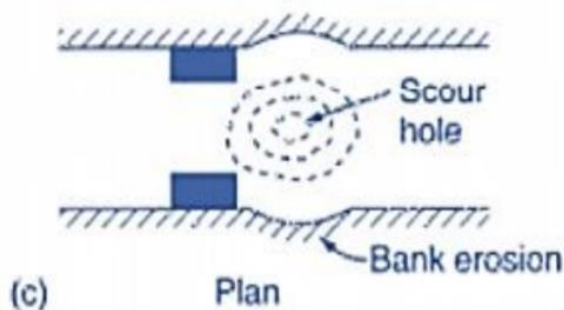


(a) Section

(b) Pier and abutment riprap moved d/s

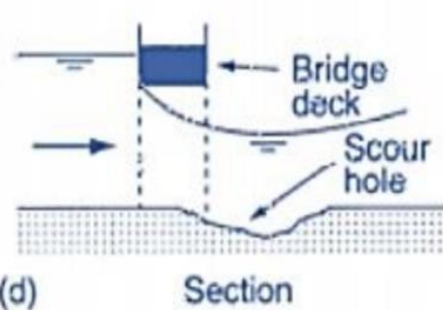


(b) Plan



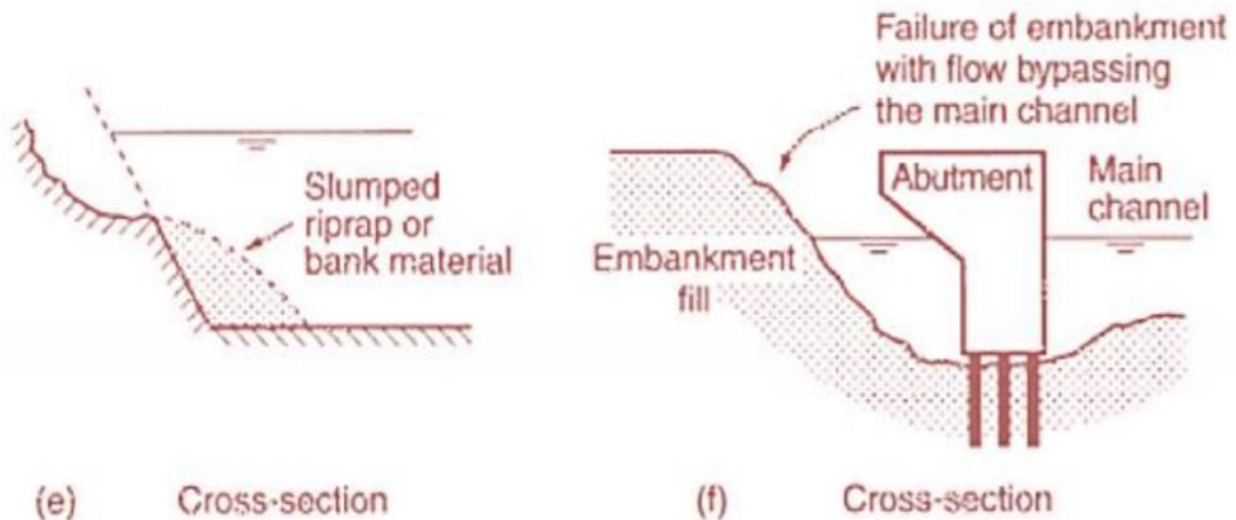
(c) Plan

(c) D/s scour hole and bank erosion



(d) Section

(d) D/s scour hole arising from submergence (pressure flow)



Gambar 3-9 Gerusan pada Jembatan (sumber: <http://196.189.45.87>>culvert and bridge material.pdf)

Tipe Gerusan

Raudkivi dan Ettema (1982) dalam Gunawan (2006:10) membedakan tipe gerusan sebagai berikut:

1. Gerusan umum dialur sungai, tidak berkaitan sama sekali dengan ada atau tidak adanya bangunan sungai.
2. Gerusan lokal di alur sungai, terjadi karena penyempitan aliran sungai menjadi terpusat.
3. Gerusan lokal di sekitar bangunan, terjadi karena pola aliran lokal di sekitar bangunan sungai.

Gerusan dari jenis (2) dan (3) selanjutnya dapat dibedakan menjadi gerusan dengan air bersih (*clear water scour*) dan gerusan dengan air bersedimen (*lived bed scour*). Gerusan dengan air bersih berkaitan dengan suatu keadaan ketika dasar sungai di sebelah hulu dalam keadaan diam (tidak ada material yang terangkut). Sedangkan gerusan dengan bersedimen terjadi ketika kondisi aliran dalam saluran menyebabkan material dasar bergerak.

Untuk menentukan kondisi aliran termasuk *clear-water* atau *live-bed*, digunakan persamaan yang diberikan Neill (1968) di bawah ini, untuk aliran sungai tanpa halangan.

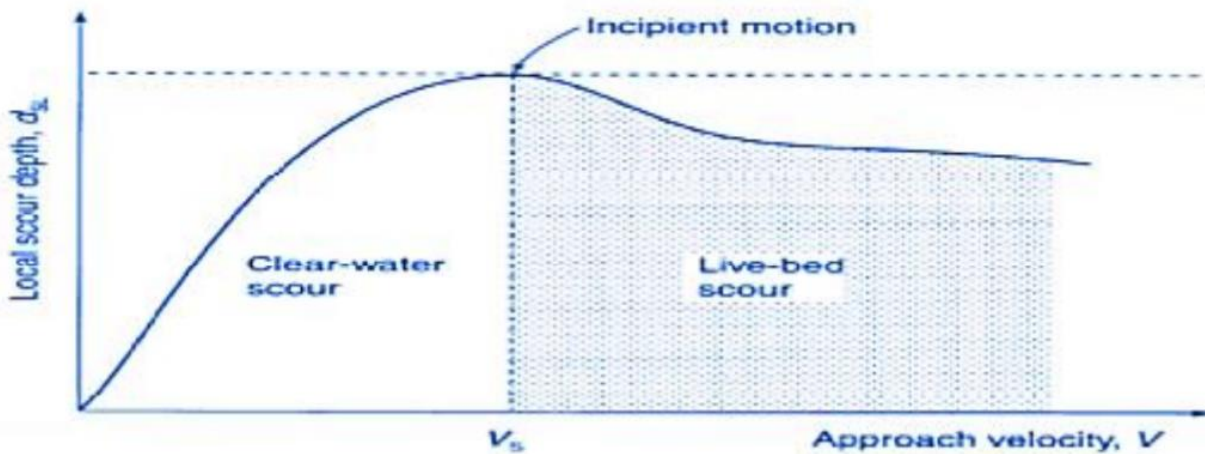
$$V_s = 1,58 [(S_s - 1) g D_{50}]^{1/2} \left(\frac{Y}{D_{50}} \right)^{1/6}$$

Dengan $S_s = 2,65$ (daya tarik spesifik untuk sedimen), $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, D_{50} adalah diameter rata-rata (m) ukuran butiran sedimen 50%, Y = kedalaman rata-rata (m) hulu sungai. Persamaan di atas menjadi

$$V_s = 6,36 Y^{1/6} D_{50}^{1/3}$$

Selama satu periode banjir, kecepatan rata-rata akan bertambah maupun berkurang seiring dengan aliran air keluar yang juga meningkat dan menurun, jadi sangat dimungkinkan untuk kondisi awal

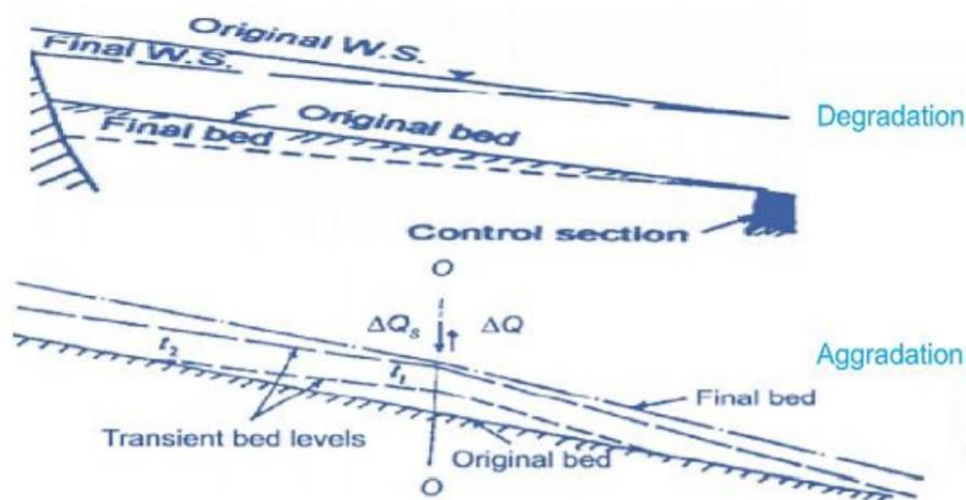
berupa *clear water* kemudian *live bed* dan akhirnya *clear water* lagi (lihat gambar di bawah). Kedalaman gerusan maksimal biasanya terjadi saat kondisi *clear water*, bukan pada saat puncak banjir dan kondisi *live bed* terjadi.



Gambar 3-10 Variasi Kedalaman Gerusan Lokal (d_{sl}) dan Kecepatan (sumber: [http://196.189.45.87>culvert and bridge material.pdf](http://196.189.45.87/culvert%20and%20bridge%20material.pdf))

Komponen utama penyebab gerusan adalah gerusan alami atau jangka panjang (degradasi atau agradasi), gerusan akibat kontraksi (bukaan jembatan), dan gerusan lokal (Pilar dan *abutment*).

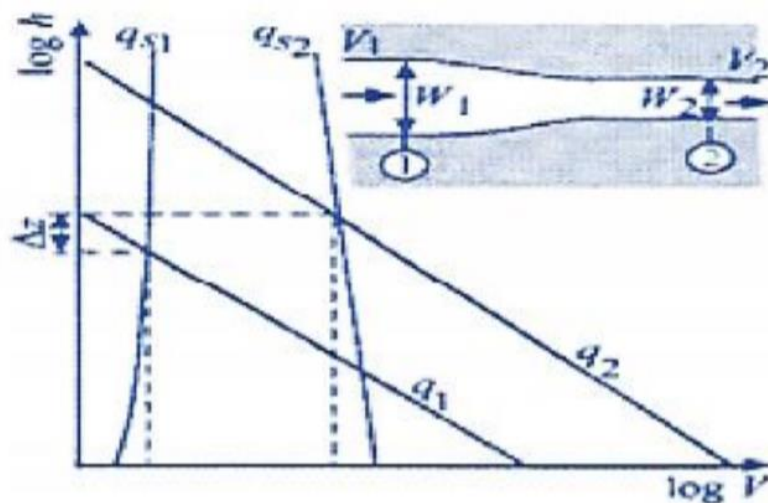
1. Degradasi atau agradasi hanya terjadi saat kondisi *live bed* ($V > V_s$) dan bukan terjadi karena konstruksi jembatan atau tanggul. Degradasi merupakan gerusan material dasar sungai karena peningkatan kapasitas transpor sedimen oleh sungai yang diakibatkan oleh peningkatan gradien energi. Agradasi merupakan berkurangnya material sedimen dasar sungai akibat penurunan kapasitas transpor sedimen oleh sungai yang disebabkan oleh berkurangnya gradien energi.



Gambar 3-11 Degradasi dan Agradasi (sumber: [http://196.189.45.87>culvert and bridge material.pdf](http://196.189.45.87/culvert%20and%20bridge%20material.pdf))

Degradasi secara kualitatif dapat diketahui menggunakan persamaan analogi keseimbangan Lane's (Lane, 1955; Bryan et al. 1995): $Q S_o \propto Q_s D_{50}$. Dengan, Q adalah aliran air keluar, S_o adalah kemiringan dasar sungai, Q_s adalah keluaran material sedimen dasar sungai, dan D_{50} adalah median dari ukuran partikel material dasar sungai. Signifikansi gerusan degradasi untuk rancangan jembatan adalah teknisi harus memutuskan bahwa elevasi sungai yang ada sekarang diperkirakan akan tetap konstan selama 100 tahun umur jembatan atau akan ada perubahan. Apabila perubahan akan timbul maka pengaruhnya ada pada rancangan jalan air dan fondasi jembatan.

2. Gerusan kontraksi/lokalisasi terjadi pada keseluruhan penampang silang sebagai hasil dari meningkatnya kecepatan akibat penyempitan saluran oleh kontraksi.



Gambar 3-12 Gerusan Kontraksi (sumber: http://196.189.45.87/culvert_and_bridge_material.pdf)

Pendekatan kedalaman aliran h_1 dan rata-rata pendekatan kecepatan aliran V_1 menghasilkan laju transpor sedimen q_{s1} . Total laju transpor terhadap kontraksi adalah $W_1 q_{s1}$, W_1 adalah lebar dari saluran. Jika laju aliran air $Q_1 = W_1 V_1$ pada hulu sungai sama dengan laju aliran pada bagian terkontraksi sehingga dengan kontinuitas:

$$q_2 = \frac{W_1}{W_2} q_1$$

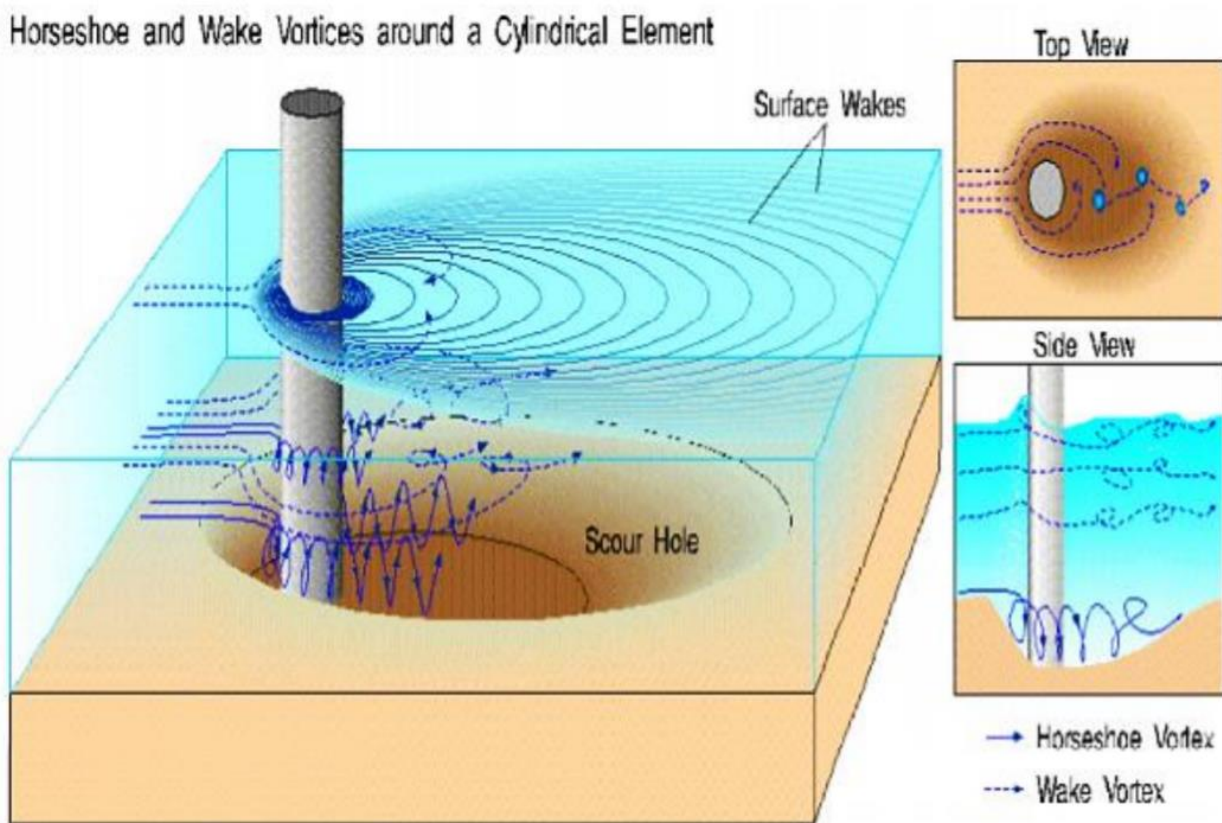
dengan $q_1 = h_1 V_1$, $q_2 = h_2 V_2$. Laju transpor sedimen pada bagian terkontraksi setelah tercapai keseimbangan menjadi

$$q_{s2} = \frac{W_1}{W_2} q_{s1}$$

kedalaman gerusan, Δz , yang diakibatkan kontraksi menjadi, $\Delta z = h_2 - h_1$. Kedalaman gerusan kontraksi merepresentasikan rata-rata kedalaman sungai dan simetri umumnya diasumsikan dalam perhitungan.

3. Gerusan lokal (pilar, *abutment*): dihasilkan dari peningkatan arus yang melintas di bawah jembatan dan aliran turbulen yang terbentuk dari adanya tebing sungai. Gerusan lokal terjadi pada suatu kecepatan aliran saat sedimen terangkut lebih besar dari sedimen yang disuplai. Angkutan sedimen bertambah dengan meningkatnya tegangan geser sedimen dan gerusan terjadi ketika perubahan kondisi aliran sehingga menyebabkan peningkatan tegangan geser dasar.

Mekanisme terjadinya gerusan adalah struktur yang ditempatkan pada suatu arus air, maka aliran air di sekitar struktur tersebut akan berubah. Kemudian, gradien kecepatan vertikal (*vertical velocity gradient*) dari aliran akan berubah menjadi gradien tekanan (*pressure gradient*) pada ujung permukaan struktur tersebut. Gradien tekanan (*pressure gradient*) ini merupakan hasil dari aliran bawah yang membentur dasar sungai. Pada dasar sungai, aliran bawah ini membentuk pusaran yang pada akhirnya menyapu sekeliling dan bagian bawah struktur dengan memenuhi seluruh aliran. Hal ini dinamakan pusaran tapal kuda (*horseshoe vortex*), karena dilihat dari atas tipe pusaran ini mirip tapal kuda. Pada permukaan air, interaksi aliran dan struktur membentuk busur ombak (*bow wave*) yang disebut sebagai gulungan permukaan (*surface roller*).



Gambar 3-13 Pola Aliran dan Lubang Gerusan pada Pilar Silinder (sumber: <http://196.189.45.87>culvert and bridge material.pdf>)

- Terdapat banyak faktor yang mempengaruhi besaran gerusan pilar:

- Faktor hidrolika: kecepatan (V), kedalaman (y), dan sudut terjadinya gerusan (θ) karena aliran yang mendekati pilar, kerapatan dan kekentalan air, bilangan Froude
- Faktor pilar: lebar, panjang, bentuk; kedalaman gerusan meningkat seiring dengan meningkatnya lebar pilar (b_p).
- Pilar berbentuk segi empat meningkatkan kedalaman gerusan sebesar 10 – 30% dibandingkan pilar berbentuk bundar.
- Faktor sedimen: distribusi ukuran partikel, D_{50} , kerapatan, karakteristik kohesif.

Pada kondisi clear-water, dalamnya gerusan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$Y_{se} = 2,3 K_a K_s K_\alpha K_s K_d, (m)$$

Dengan Y_{se} : kedalaman gerusan seimbang (m); K_a : faktor posisi pilar; K_s : faktor tipe pilar; K_α : sudut dalam alir; K_s : faktor ukuran pilar; K_d : faktor ketinggian pilar

Besaran nilai semua faktor tergantung pada tipe pilar.

➤ Kedalaman gerusan lokal pada *abutment* (d_{SA})

Abutment adalah bagian konstruksi jembatan yang terletak ditepi sungai yang merupakan pangkal jembatan yang berfungsi sebagai tumpuan beban jembatan. Walaupun terletak ditepi sungai, namun sebagaimana halnya pilar jembatan, dasar sungai di sekitar *abutment* dapat pula mengalami gerusan yang diakibatkan oleh perubahan pola aliran, karena struktur *abutment* selalu berhubungan langsung dengan aliran sungai. Jembatan yang melintas di atas suatu sungai mempengaruhi karakteristik aliran, utamanya aliran balik (*backwater*) yang diakibatkan terhambatnya aliran akibat *abutment* jembatan.

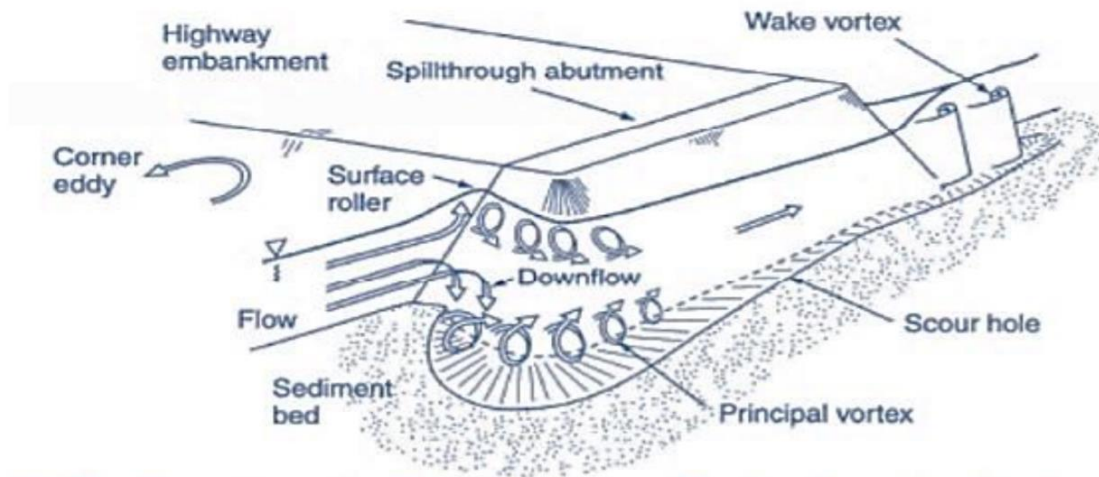
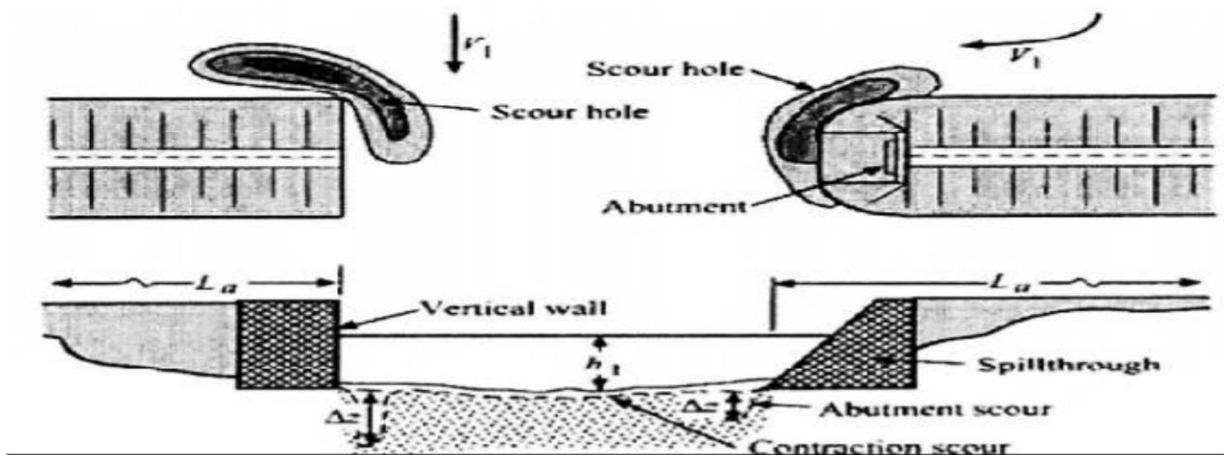


Fig. The flow pattern at a spillthrough abutment. The downflow and principal vortex are the main causes of local bed erosion.

Gambar 3-14 Gerusan pada Abutment (sumber: <http://196.189.45.87>culvert and bridge material.pdf>)

Beberapa faktor yang mempengaruhi terjadinya gerusan *abutment* meliputi topografi sungai (jumlah aliran yang diintersep oleh *abutment* jembatan), bentuk *abutment*, dan karakteristik hidrolika material sedimen.



Gambar 3-15 Gerusan pada Abutment (sumber: <http://196.189.45.87>culvert and bridge material.pdf>)

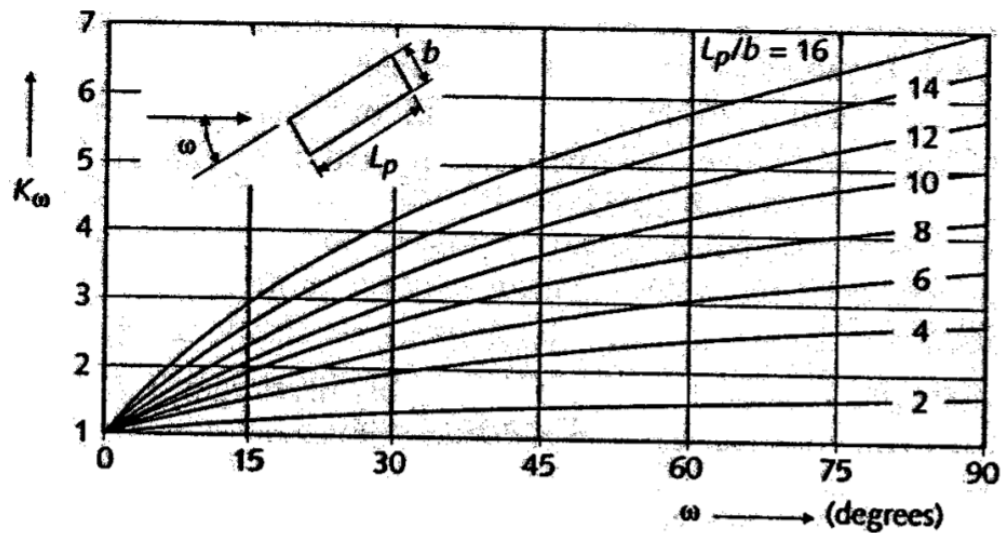
Persamaan Garde dan Raju (1997) digunakan pada gerusan lokal di sekitar pilar dan *abutment* jembatan untuk aliran *clear-water* dan *live bed*, menghitung kedalaman gerusan

$$\frac{d_m}{b} = \frac{4,0}{\alpha} \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \left[\frac{U}{\sqrt{gh_0}} \right]^n$$

Dengan nilai $\eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4$ merupakan koefisien ukuran butiran, lebar *abutment*, sudut datang dan bentuk geometri *abutment*.

Tabel 3.3 Variasi nilai η_1 (koefisien ukuran butiran) dan n (fungsi ukuran sedimen dan geometri halangan) terhadap d (distribusi ukuran butiran)

d (mm)	0,29	0,45	1	2,15	4	7,5	10,5
η_1	1	1,09	1,15	1,0	0,85	0,66	0,54
n	0,68	0,75	0,85	0,93	1,05	0,9	0,85



Gambar 3-16 Pengaruh Koefisien η_3 terhadap Sudut Datang Aliran (sumber: *Rustiati, N. B. 2007*)

Tabel 3.4 Koefisien Bentuk *Abutment*

Bentuk	η_4
Rectangular	1.00
Circular (or semicircular)	0.81- 0.90
Lenticular nose (2 : 1)	0.80
Lenticular nose (3 : 1)	0.70
Lenticular nose (4 : 1)	0.56
Joukowsky (5 : 1)	0.67
Elliptic nose (2 : 1)	0.80
Elliptic nose (3 : 1)	0.75
Triangular nose 150 apex angle	0.38
30°	0.52
60°	0.64
90°	0.75
120°	0.80
150°	0.86

BAB 4. CARA MENGHITUNG *BACKWATER* DAN *AFFLUX*

Backwater (aliran balik) terjadi ketika aliran air mengalami hambatan karena adanya bangunan atau rintangan pada saluran; misalnya tanggul, bendungan, jembatan, dan lain-lain. Agar saluran tetap berfungsi untuk mengalirkan air dengan baik dan sesuai perencanaan, maka pengaruh *backwater* harus diperhitungkan dan digunakan sebagai dasar penentuan bangunan pelengkap.

Afflux merupakan kenaikan muka air di atas muka air normal. Aliran air normal terganggu dengan dibangunnya pilar dan pangkal jembatan. Pada lokasi hidung pilar bagian hulu aliran air menjadi naik. Setelah melewati hidung pada dinding pilar terjadi penurunan dan setelah melewati hidung bagian hilir aliran air menjadi normal kembali. *Afflux* harus dijadikan pertimbangan untuk menghitung stabilitas pilar dan pangkal jembatan.

4.1 Menghitung *Backwater*

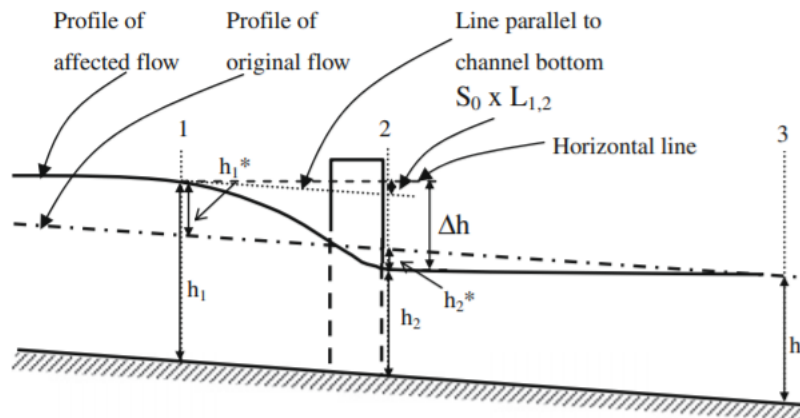
United States Geological Survey (USGS) mengembangkan sebuah metode untuk menghitung *backwater* yang terjadi saat aliran melewati penyempitan jembatan, berdasarkan studi model dan verifikasi menggunakan data lapangan. *United States Federal Highway Administration* juga mengembangkan sebuah metode untuk menghitung *backwater* jembatan menggunakan studi model dan survei data lapangan. Tetapi, data lapangan yang dilaporkan oleh Neely [*] menunjukkan bahwa *backwater* yang dihitung menggunakan kedua metode di atas memberikan hasil rata-rata kurang dari 50% terhadap *backwater* yang diukur di lapangan.

[*] Neely BL. *Hydraulic performance of bridges, hydraulic efficiency of bridges— analysis of field data. Unpublished Report Conducted by US Geological Survey, June 30; 1966.*

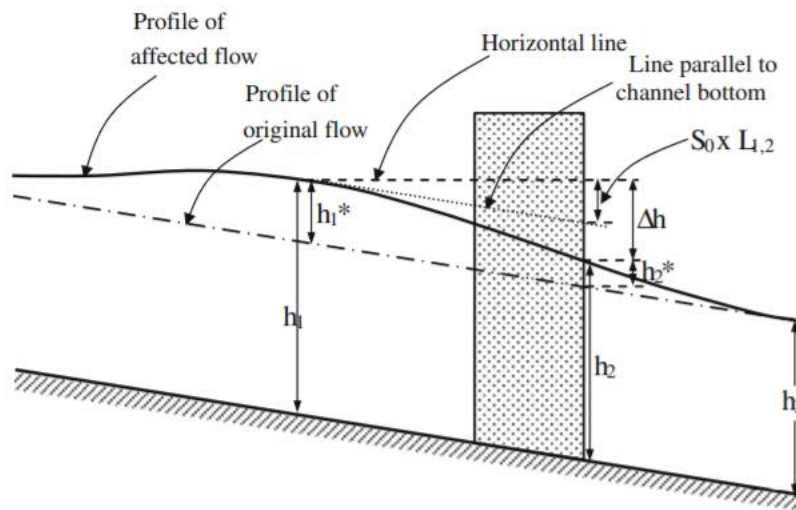
4.1.1 Rangkuman Data Lapangan

Selama periode 1961–1965, kondisi banjir diamati pada 92 jembatan di 35 persimpangan sungai. Pada tiap lokasi, pengukuran aliran air keluar, distribusi aliran pada jalan air jembatan, dan elevasi permukaan air di hulu dan hilir saluran diukur. Schneider et al. menunjukkan data lapangan yang dikumpulkan Neely diambil pada lokasi jembatan dengan dataran banjir yang lebar dan rimbun dengan vegetasi; memiliki lebar bervariasi dari 3,5 sampai 11 kali lebar bukaan jembatan. Koefisien kekasaran Manning bervariasi dari 0,03 sampai lebih dari 0,25. Metode USGS dan USBPR dikembangkan untuk dataran banjir dengan lebar berkisar dari 0 sampai 5 kali lebar bukaan jembatan dan koefisien kekasaran Manning hingga 0,05. Oleh karena itu, kedua metode ini tidak ditujukan untuk menghitung *backwater* jembatan dengan data lapangan yang dilaporkan oleh Neely. Data lapangan Neely mengindikasikan bahwa permukaan air pada hilir struktur jembatan lebih tinggi dibandingkan kondisi

normal dan pengamatan di laboratorium. Gambar 1 dan 2 menggambarkan definisi aliran tenang yang mengalir melalui penyempitan jembatan; gambar pertama merupakan pengamatan di laboratorium dan kedua adalah pengamatan di lapangan.



Gambar 4-17 Profil Aliran Backwater melalui Penyempitan yang Diamati di Laboratorium (sumber: G. Seckin et al. 2009)



Gambar 4-18 Profil Aliran Backwater melalui Penyempitan yang Diamati di Lapangan (sumber: G. Seckin et al. 2009)

4.1.3 Penjelasan Latar Belakang Metode

1. Metode USBPR

Backwater, yang merupakan perbedaan kedalaman antara sektor 1 yang terdampak dan aliran air normal, h_1^* , dihitung menggunakan persamaan energi antara sektor 1 dan 3 pada gambar 1:

$$h_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = h_3 + \frac{\alpha_3 V_3^2}{2g} + K^* \left(\frac{\alpha_2 V n_2^2}{2g} \right)$$

dengan h_1 and h_3 adalah kedalaman; α_1 and α_3 adalah faktor koreksi kecepatan utama; V_1 dan V_3 adalah rata-rata kecepatan pada sektor 1 dan 3 berurutan; g adalah percepatan gravitasi; $V n_2$ adalah

kecepatan hipotesis pada sektor dengan penyempitan ketika profil aliran terdampak bersinggungan dengan profil aliran seragam pada kedalaman yang seragam.

K^* pada persamaan di atas disebut koefisien *backwater* dan ditentukan melalui data yang didapat dari eksperimen di laboratorium yang merupakan fungsi dari rasio penyempitan (m); eksentrisitas (e); *skew*; jumlah dan bentuk pilar; dan tipe *abutment*.

Pengembang metode USBPR menemukan bahwa rasio tingkat diferensial, $\Delta b [= h_1^*/(h_1^* + h_2^*)]$ dengan h_2^* didefinisikan sebagai perbedaan kedalaman pada sektor 2 untuk aliran terdampak dan normal, sangat berkorelasi dengan rasio penyempitan, m . Setelah itu, saat h_1^* ditentukan, h_2^* dapat dihitung menggunakan *nomograph* karena relasi antara Δb dan m . Perbedaan elevasi permukaan air antara sektor 1 dan 2, Δh , kemudian dihitung menggunakan metode USBPR:

$$\Delta h = h_1^* + h_2^* + S_0 L_{1,2}$$

Dengan S_0 adalah kemiringan tebing dan L merupakan jarak antara sektor 1 dan 2.

2. Metode USGS

Metode USGS awalnya dikembangkan untuk menghitung aliran air keluar dengan perbedaan elevasi permukaan air antara sektor 1 dan 2, Δh , melalui pengamatan tanda bekas air banjir yang telah surut. Konsep yang mendasari metode ini adalah penggunaan struktur jembatan sebagai cara lain untuk mengukur puncak aliran air keluar di sungai, dengan menggunakan Q sebagai fungsi Δh . Δh dihitung menggunakan persamaan:

$$\Delta h = \frac{1}{C^2} \frac{Q^2}{2gA_2^2} + fr_{1,2} - \alpha_1 \frac{Q^2}{2gA_1^2}$$

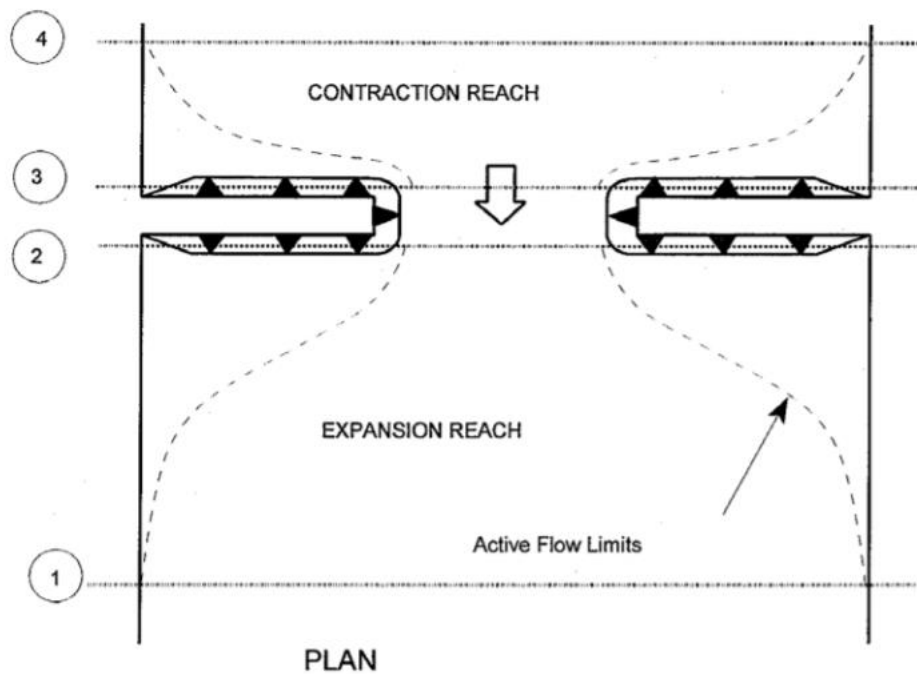
Dengan C adalah koefisien aliran air keluar, α_1 dan α_2 adalah keseluruhan area pada sektor 1 dan 2, $fr_{1,2}$ adalah kehilangan gesekan antara sektor 1 dan 2 yang ditentukan menggunakan persamaan

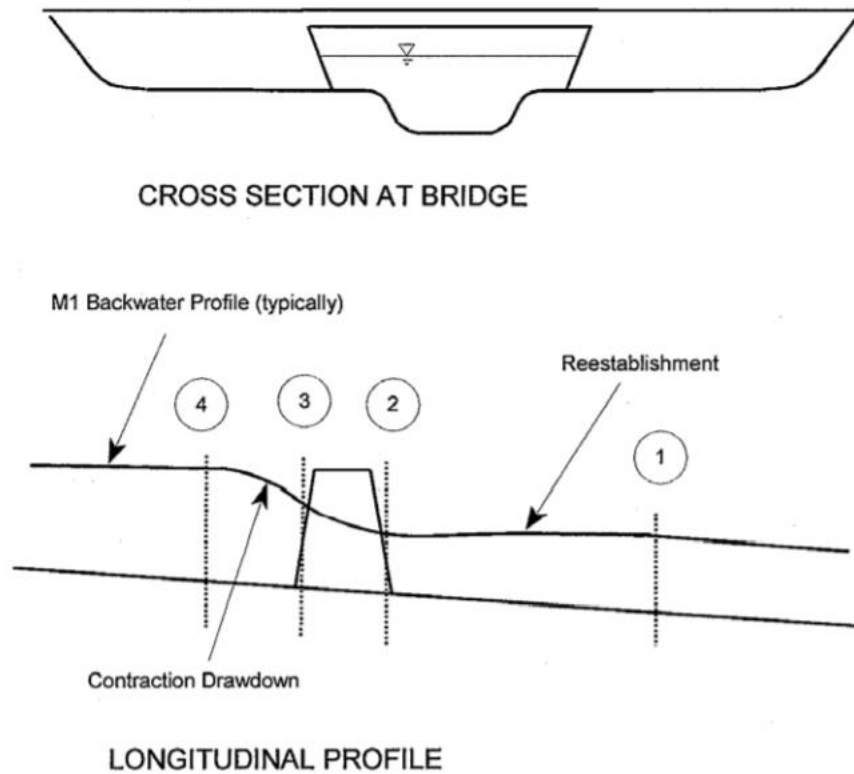
$$fr_{1,2} = \frac{Q^2}{K_1 K_2} L^* + \left(\frac{Q}{K_2}\right)^2 L_b$$

dengan K_1 dan K_2 adalah pengangkutan aliran sektor 1 dan 2, L^* adalah panjang jangkauan antara sektor 1 dan muka hulu jembatan, dan L_b adalah panjang antara muka hulu dan hilir jembatan. Metode USGS juga menentukan hubungan antara $h_1^*/(h_1^* + h_2^*)$ dan rasio penyempitan, m . metode USGS menghitung Δh dulu, kemudian *backwater*, h_1^* . Sedangkan metode USBPR menghitung h_1^* dulu, kemudian Δh . h_1^* dan h_2^* sulit untuk diukur langsung di lapangan karena aliran air normal tanpa adanya penyempitan tidak diketahui, sehingga Neely menggunakan nilai Δh yang diamati di lapangan, untuk membandingkan metode USGS dan USBPR.

4.1.4 Metode USGS dalam Menghitung Aliran Air Keluar Secara Tidak Langsung

Pada aliran subkritis, *backwater* terbentuk ketika kedalaman aliran lebih besar dibandingkan dengan kondisi normal tanpa penyempitan. Lokasi dengan efek *backwater* paling besar berada pada bagian hulu di ujung jangkauan penyempitan yang digambarkan pada sektor 1 gambar di bawah ini. Kecepatan aliran dan kehilangan gesekan meningkat dengan bertambahnya jarak dari titik ini menuju jembatan. Bertambahnya kehilangan energi pada jangkauan ini terjadi karena penambahan kecepatan dan adanya turbulensi momentum seiring dengan aliran air yang menyempit.





Gambar 4-19 Aliran pada Jembatan: Rencana, Sektor, Profil (sumber: Hunt, J. H dan Brunner, G. W. 1995)

Pada area sekitar penyempitan jembatan, antara sektor 2 dan 3 pada gambar di bawah ini, permukaan air turun ke bawah dengan cepat dan kecepatan aliran mencapai nilai maksimal. Kehilangan energi yang besar antara sektor 2 dan 3 terjadi karena nilai kecepatan yang sangat tinggi dan tarikan yang diakibatkan pilar dan *abutment*. Bagian hilir jembatan, antara sektor 1 dan 2, aliran melebar untuk membentuk kembali kondisi aliran dengan lebar maksimal (*expansion reach*). Kehilangan energi yang melebihi kondisi normal pada jangkauan ini terjadi karena kecepatan aliran yang lebih tinggi dan pertukaran momentum turbulensi yang terkait dengan aliran yang melebar. Keseluruhan sisa kehilangan energi karena jembatan terjadi antara titik *backwater* maksimal di hulu dan titik pelebaran maksimal di hilir (sektor 1 dan 4 berurutan).

Institut Teknologi Georgia pada tahun 1953 memformalkan metode pengukuran secara tidak langsung oleh USGS berdasarkan riset di laboratorium dan metode ini dikenal sebagai metode bukaan terkontraksi (*contracted-opening method*). Rumus aliran air keluar pada metode ini menggunakan puncak aliran air keluar sebagai fungsi dari perubahan elevasi air permukaan antara sektor hulu dan sektor hilir pada bagian paling terkontraksi. Rumus dasar dari persamaan aliran air keluar ini yaitu

$$Q = CA_2 \sqrt{2g \left(\Delta h + \alpha_4 \frac{V_4^2}{2g} - h_f \right)}$$

dengan:

Q = puncak aliran air keluar (dalam cfs)

C = koefisien aliran air keluar

A_2 = keseluruhan area sektor 2 (kaki kuadrat)

g = percepatan karena gaya gravitasi (kaki per detik kuadrat)

Δh = perbedaan elevasi permukaan air antara sektor 4 dan sektor paling terkontraksi di jembatan (kaki)

h_f = *head loss* (kaki) karena gesekan antara sektor 4 dan sektor terkontraksi

α_4 = koefisien koreksi energi kinetik sektor 4

V_4 = kecepatan rata-rata sektor 4 (kaki per detik)

Sektor 4 adalah ujung hulu dari jangkauan kontraksi dan sektor 2 adalah sektor paling terkontraksi (lihat gambar di atas).

4.1.5 Kekurangan Metode USGS dalam Menghitung *Backwater*

Kedua metode pada penjelasan sebelumnya dikembangkan berdasarkan data yang diperoleh dari laboratorium dan hanya sejumlah kecil data diperoleh dari kondisi lapangan. Ketika data lapangan diperoleh, kedua metode memiliki kelemahan dalam estimasi *backwater* yang akurat secara konsisten. Kelemahan kedua metode ini terutama terlihat dalam menghitung *backwater* pada kondisi lapangan dengan dataran banjir yang lebar dan rimbun dengan vegetasi. Schneider et al. (USGS, 1977) mengembangkan metode analisis hidrolik baru menggunakan data lapangan yang diperoleh dan terbukti lebih akurat dalam aplikasinya di lapangan.

Kedua metode sebelumnya menjumlahkan keseluruhan sisa kehilangan energi pada koefisien empiris tunggal. Sementara, metode baru yang dikembangkan oleh Schneider et al. membagi total kehilangan energi ke dalam tiga bagian: jangkauan sektor 2, jangkauan kontraksi, dan jangkauan ekspansi. Pada jangkauan sektor 2, kehilangan energi diestimasi sebagai kemiringan gesekan rata-rata dikalikan panjang garis arus rata-rata pada jangkauan tersebut. Sebuah tabel disediakan oleh Schneider et al. untuk digunakan dalam menghitung panjang garis arus rata-rata sebagai fungsi dari kepelikan kontraksi. Kehilangan energi pada jangkauan terkontraksi dihitung dengan menggandakan kemiringan gesekan pada sektor paling terkontraksi dengan garis lurus terhadap panjang jangkauan. Total kehilangan energi antara sektor 4 dan sektor 2 kemudian dihitung menggunakan persamaan

$$h_f (4 - 2) = Q^2 \left[\frac{L_a(4-3)}{K_4 K_c} + \frac{L(3-2)}{K_2^2} \right]$$

dengan:

$h_f (4 - 2) =$ total kehilangan energi antara sektor 4 dan 2

$Q =$ debit aliran air keluar

$L_a (4 - 3) =$ panjang rata-rata garis arus pada jangkauan sektor 2

$K_i =$ pengangkutan aliran pada sektor i , dihitung menggunakan persamaan Manning

$K_c =$ pengangkutan aliran K_2 dan K_q yang lebih kecil

$K_q =$ bagian dari total sektor 4 mengandung pengangkutan aliran di antara lebar jembatan

Kehilangan jangkauan ekspansi dibagi menjadi dua komponen: kehilangan gesekan dan kehilangan ekspansi aliran. Kehilangan gesekan diperoleh dengan mengkalikan kemiringan gesekan rata-rata dan panjang jangkauan ekspansi. Untuk kehilangan ekspansi aliran, tanpa penurunan, Schneider et al. memberikan pendekatan persamaan momentum, energi, dan kontinuitas untuk ekspansi saluran persegi panjang ideal. Persamaan kehilangan gesekan dan kehilangan ekspansi aliran diberikan melalui persamaan berikut

Untuk kehilangan gesekan:

$$h_f (2 - 1) = \frac{bQ^2}{K_1 K_c}$$

Untuk kehilangan ekspansi aliran:

$$h_e = \frac{Q^2}{2gA_1^2} \left[2(\beta_1 - \alpha_1) - 2\beta_2 \frac{A_1}{A_2} + \alpha_2 \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right]$$

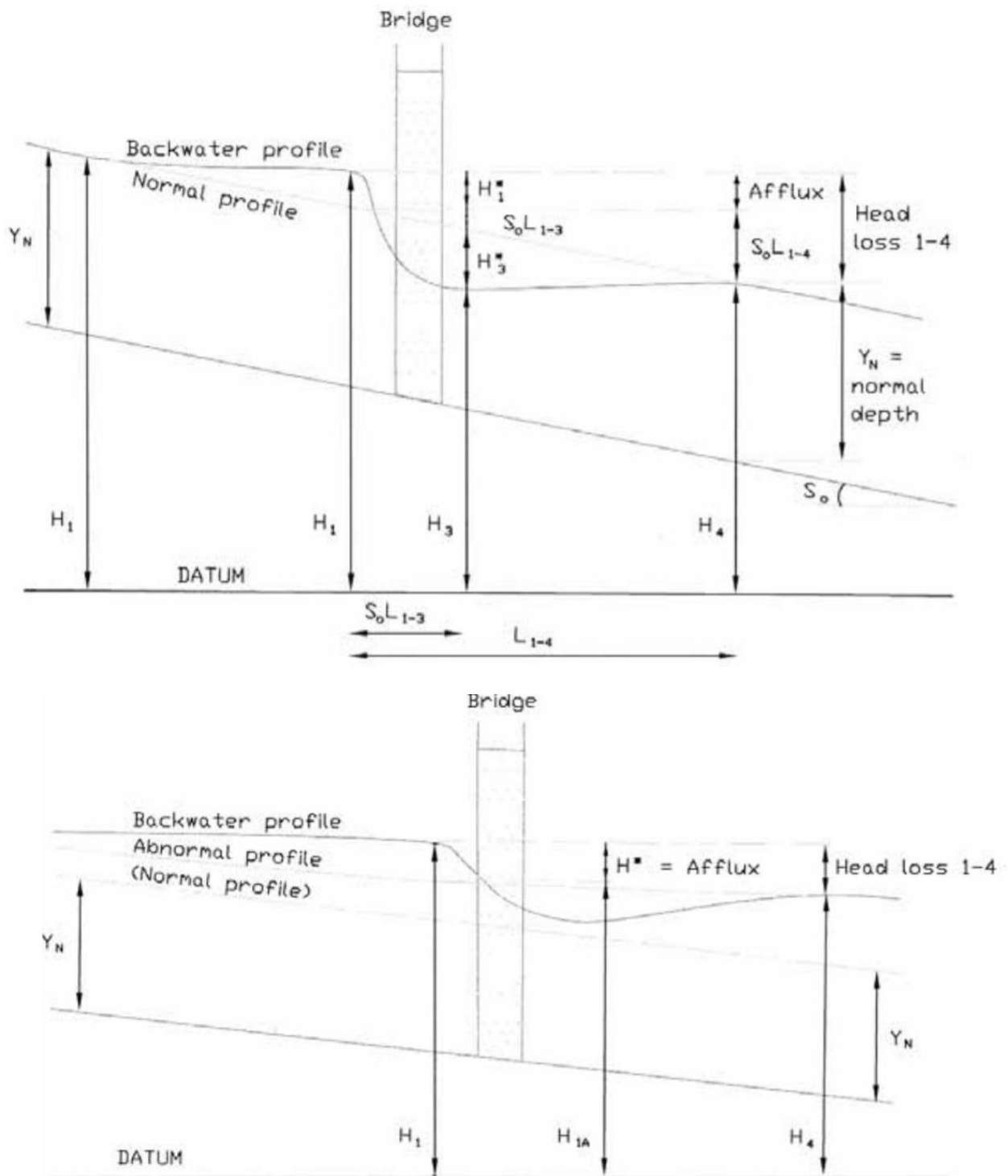
$h_e =$ *head loss* karena ekspansi aliran

$b =$ lebar bukaan jembatan

$\beta_i =$ koefisien koreksi momentum untuk momentum pada sektor i

4.2 Pendekatan Umum untuk Estimasi *Afflux*

4.2.1 Penjelasan Metode Teoritis dan Empiris



Gambar 4-20 Ilustrasi *Afflux* (sumber: A Kirby and K Gugesarajah, 2004)

Terdapat metode teoritis dan empiris dalam berbagai formula untuk estimasi *afflux* ketika aliran air melewati penyempitan jembatan. Metode teoritis dapat dikategorikan menjadi:

- Metode berdasarkan konservasi energi
- Metode berdasarkan konservasi momentum

Kelebihan utama metode pendekatan keseimbangan momentum yaitu kehilangan energi yang disebabkan oleh ekspansi atau kontraksi dapat digunakan dalam persamaan, sedangkan metode pendekatan persamaan energi membutuhkan koefisien yang tepat untuk estimasi kehilangan energi pada titik masuk dan keluar.

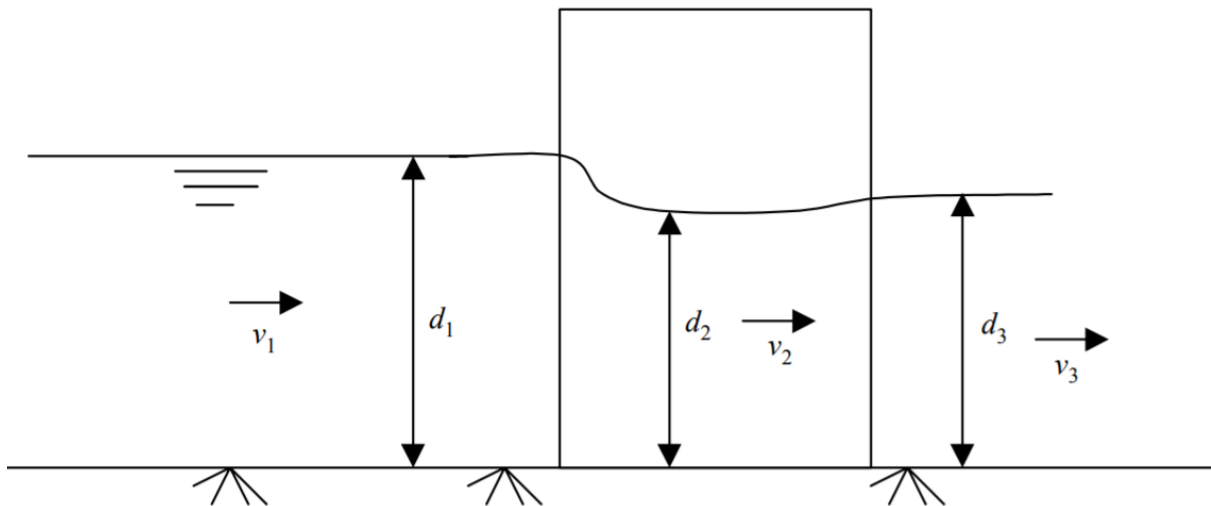
Pendekatan empiris didasarkan pada eksperimen laboratorium atau data lapangan maupun kombinasi keduanya. Hubungan yang telah dikembangkan dalam pendekatan ini umumnya meliputi koefisien aliran air keluar, kecepatan di jalan air tanpa halangan, dan faktor yang berkaitan dengan daerah aliran terkontraksi dan tanpa halangan. Tarikan pada pilar jembatan juga berkontribusi pada *afflux*. Tekanan pada tarikan di sekitar pilar dapat disertakan dalam persamaan momentum menggunakan koefisien tarikan yang tepat berdasarkan bentuk pilar.

4.2.2 Metode Berdasarkan Konservasi Energi

Pada metode ini, keseimbangan energi mempertimbangkan sektor hulu, penyempitan jembatan, dan sektor hilir sungai (gambar di bawah). Dengan mengaplikasikan persamaan Bernoulli pada sektor ini maka akan diperoleh

Sektor 1 dan 2

$$d_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = d_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + \Delta h_{12}$$



Gambar 4-21 Tampak Elevasi Penyempitan Saluran (Analisis Energi) (sumber: A Kirby and K Gugesarajah, 2004)

Sektor 2 dan 3

$$d_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} = d_3 + \alpha_3 \frac{v_3^2}{2g} + \Delta h_{23}$$

dengan:

d_1 = kedalaman aliran pada hulu penyempitan

α_1 = koefisien energi pada hulu penyempitan

v_1 = kecepatan aliran pada hulu penyempitan

d_2 = kedalaman aliran di antara penyempitan

α_2 = koefisien energi di antara penyempitan

v_2 = kecepatan aliran di antara penyempitan

d_3 = kedalaman aliran pada hilir penyempitan

α_3 = koefisien energi pada hilir penyempitan

v_3 = kecepatan aliran pada hilir penyempitan

Δh_{12} = titik awal kehilangan energi

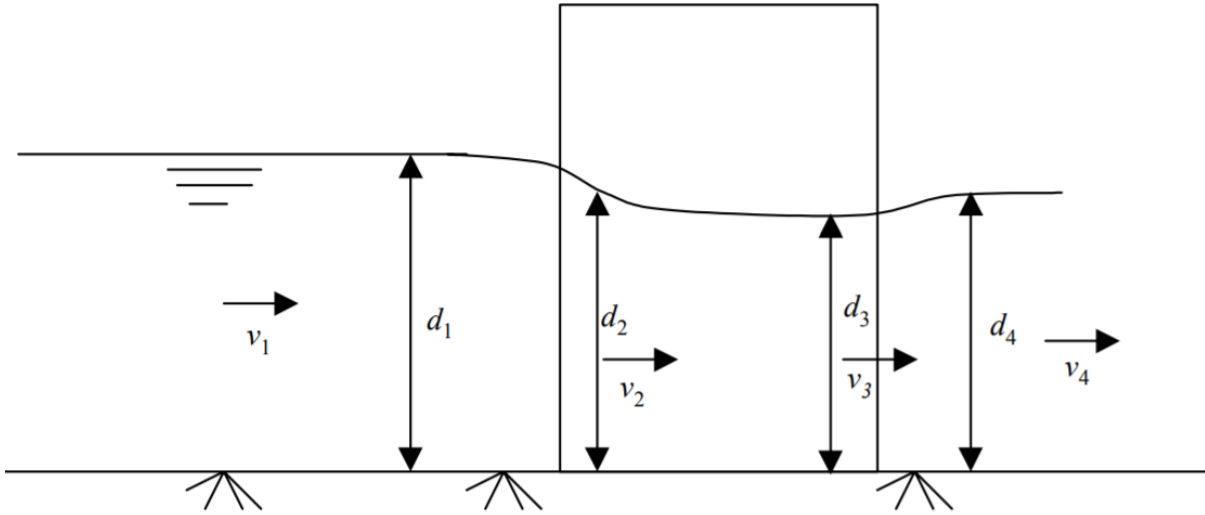
Δh_{23} = titik akhir kehilangan energi

Dari kedua persamaan di atas, perbedaan ketinggian air antara sektor 1 dan 3 dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\Delta h_a = \alpha_3 \frac{v_3^2}{2g} - \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + \Delta h_{12} + \Delta h_{23}$$

4.2.3 Metode Berdasarkan Konservasi Momentum

Persamaan momentum menghitung mengenai momentum, gaya yang disebabkan tekanan, tahanan gesek, dan gaya gravitasi. Aplikasi persamaan momentum diberikan untuk keempat sektor yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini. Untuk aliran subkritis, perhitungan dilakukan dari bagian hilir kemudian diproses menuju hulu. Untuk aliran superkritis, perhitungan dilakukan pada bagian hulu menuju bagian hilir. Persamaan momentum di bawah ini ditujukan untuk kondisi stabil.



Gambar 4-22 Tampak Elevasi Penyempitan Saluran (Analisis Momentum) (sumber: A Kirby and K Gugesarajah, 2004)

Sektor 1 dan 2

Persamaan momentum diaplikasikan dengan mempertimbangkan kontrol volume antara sektor 1 dan 2.

$$A_1 \bar{Y}_1 + \beta_1 \frac{Q_1^2}{gA_1} = \sum A_{2i} \bar{Y}_{2i} + \sum \beta_{2i} \frac{Q_{2i}^2}{gA_{2i}} + \sum A_{ui} Y_{ui} + \sum D_i + F_{12i} - W_{12i}$$

dengan

A_1 = daerah aliran hulu pada bagian penyempitan

\bar{Y}_1 = pusat dari daerah aliran hulu pada bagian penyempitan

Q_1 = laju aliran hulu

g = gravitasi

β = koefisien momentum

i = unit

$2i$ = elemen pada penyempitan

A_{ui} = daerah halangan pada bagian hulu pilar atau *abutment*

\bar{Y}_{ui} = pusat daerah halangan pada sisi hulu pilar

D_i = gaya akibat tarikan

F_{12i} = gaya akibat gesekan

W_{12i} = gaya akibat berat air pada arah aliran

Persamaan kontinuitas adalah

$$Q_1 = \sum Q_{2i}$$

Sektor 2 dan 3

Persamaan momentum diaplikasikan melalui unit tunggal melalui persamaan berikut

$$A_{2i}\bar{V}_{2i} + \beta_{2i} \frac{Q_{2i}^2}{gA_{2i}} = A_{3i}\bar{V}_{2i} + \beta_{3i} \frac{Q_{3i}^2}{gA_{3i}} + F_{23i} - W_{23i}$$

Persamaan kontinuitas:

$$\sum Q_{2i} = \sum Q_{3i}$$

Sektor 3 dan 4

Kontrol volume antara sektor 1 dan 2, persamaan momentum dapat diaplikasikan pada kontrol volume antara sektor 3 dan 4

$$\sum A_{3i}\bar{V}_{3i} + \sum \beta_{3i} \frac{Q_{3i}^2}{gA_{3i}} + \sum A_{di}Y_{di} - F_{34i} + W_{34i} = A_4\bar{V}_4 + \beta_4 \frac{Q_4^2}{gA_4}$$

Persamaan kontinuitas:

$$\sum Q_{3i} = Q_4$$

Metode-metode lain untuk estimasi afflux di antaranya:

- *rules of thumb*
- metode Biery and Delleur (jembatan lengkung)
- metode HR (jembatan lengkung)
- Nagler (pilar)
- Yarnell (pilar)
- D'Aubuisson (pilar)
- Penggunaan bendung dan persamaan aliran orifis

4.2.4 Aliran Orifis

Aliran orifis terjadi ketika air melakukan kontak dengan ujung hulu dek sebuah jembatan dan ketinggian air pada penyempitan tersebut lebih rendah dari bagian sisi bawah jembatan. Aliran orifis dapat dihitung melalui persamaan berikut:

$$Q = C_d A \sqrt{2g \left(d_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} - d_2 \right)}$$

dengan

Q = aliran air keluar yang melalui jembatan

C_d = koefisien aliran air keluar

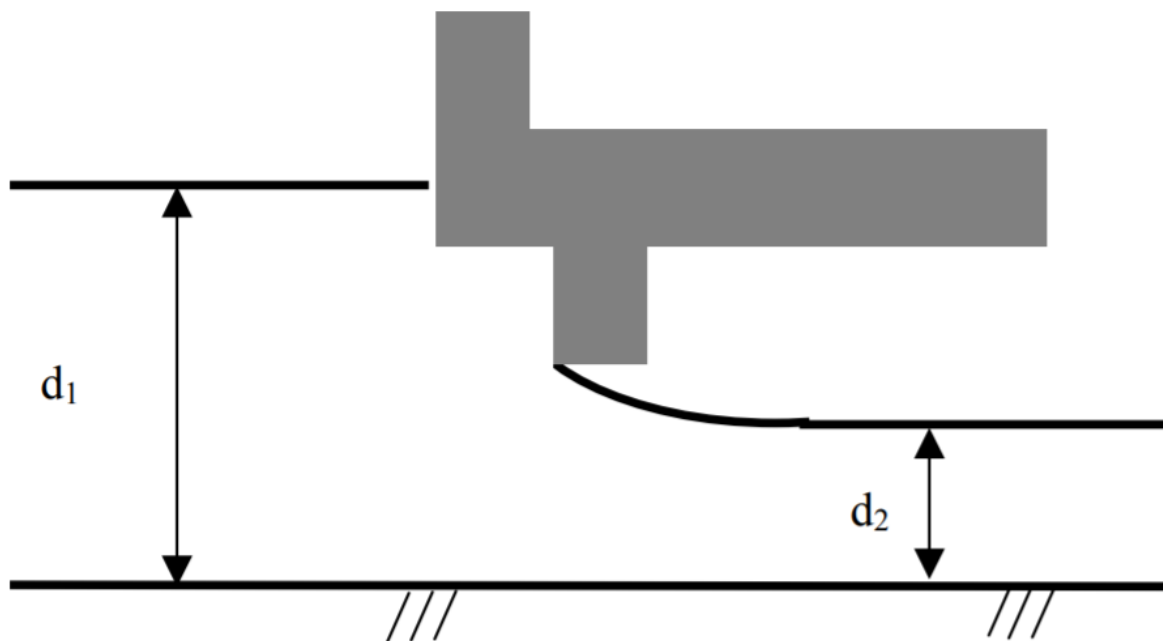
A = area bukaan jembatan

d_1 = kedalaman aliran bagian hulu

α_1 = koefisien energi

v_1 = kecepatan pada bagian hulu saluran (sektor 1)

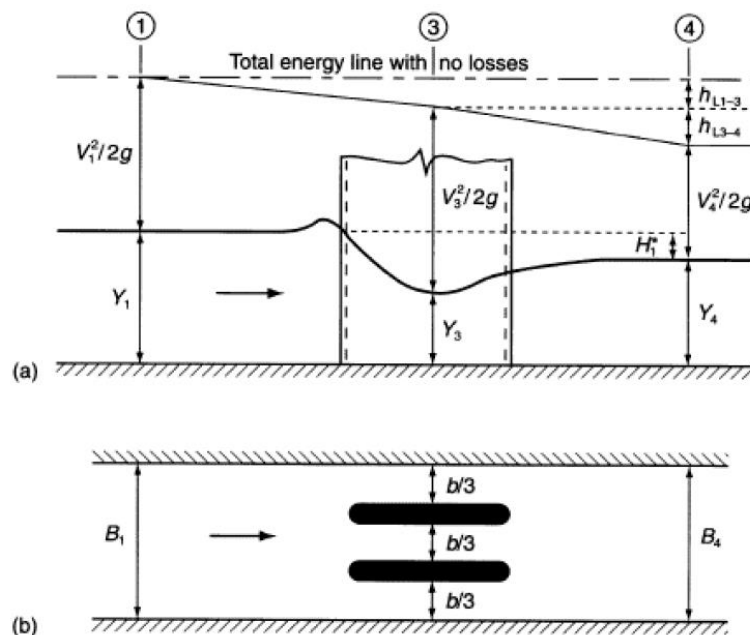
Koefisien aliran air keluar dapat berada pada rentang 0,35 hingga 0,6.



Gambar 4-23 Aliran Orifis (sumber: A Kirby and K Gugesarajah, 2004)

BAB 5. ANALISIS ALIRAN YANG MELEWATI PILAR DAN *TRESTLE*

Pembahasan kali ini akan lebih berfokus pada kerusakan jembatan yang dikarenakan oleh pilar yang dilalui aliran air, sedangkan efek aliran air yang melalui *abutment* diabaikan. Gangguan terhadap pilar jembatan dikarenakan aliran air telah dipelajari selama lebih dari 150 tahun. Salah satu penelitian awal dilakukan oleh d'Aubuisson (1840), diikuti oleh Nagler (1918) dan Yarnell (1934). Aliran air yang terbentuk pada awalnya adalah subkritis. *Backwater* terjadi di hulu, meningkatkan kedalaman pada sektor 1, sedangkan kedalaman di antara pilar menurun hingga nilai minimum pada sektor 3 seiring dengan bertambahnya kecepatan aliran (lihat gambar 5.1). Pada sektor 4, di hilir jembatan, aliran berada pada kedalaman normal. Di antara sektor 3 dan 4 terdapat area turbulensi dikarenakan arus yang ditimbulkan oleh pilar dan aliran yang mengembang.

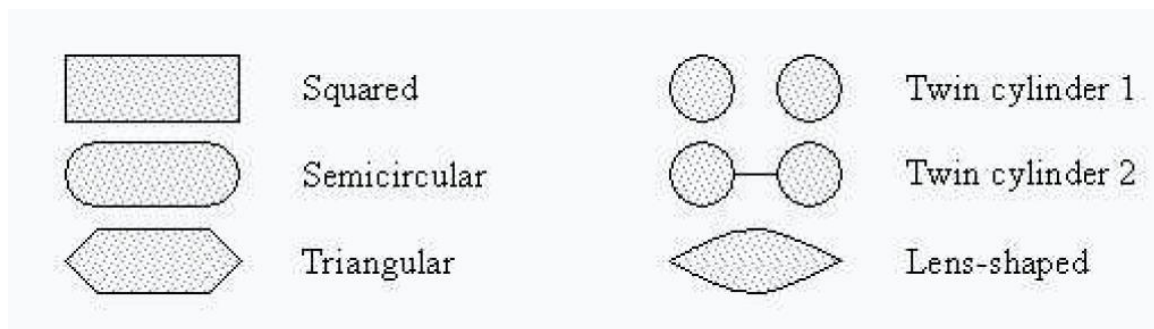


Gambar 5-1 Aliran Air yang Melewati Jembatan (sumber: Les Hamill, 1999)

Pedekatan pemodelan jembatan dapat dibagi menjadi metode aliran bebas saja atau metode yang mengkombinasikan dengan aliran terbenam/meluap. Metode aliran bebas kemudian dibagi lagi menjadi metode untuk pilar dan lengkungan. Metode yang dirancang khusus untuk pilar adalah

1. Pilar Jembatan (Nagler): penggambaran tipe aliran orifis dengan memperhitungkan efek pilar melalui faktor penyesuaian.

Persamaan Nagler ditentukan berdasarkan percobaan. Persamaan ini dapat diaplikasikan pada pilar jembatan dengan bentuk yang berbeda-beda. Bentuk pilar diperhitungkan melalui koefisien aliran air keluar berdasarkan tabel tipe pilar. Persamaan ini diturunkan dari persamaan aliran bebas dan tidak cukup akurat untuk aliran berkecepatan tinggi.



Gambar 5-2 Bentuk-Bentuk Pilar (sumber: DHI, 2009)

Persamaan Nagler yaitu:

$$Q = K_N b \sqrt{2g} \left(Y_{ds} - \theta \frac{V_{ds}^2}{2g} \right) \left(h_{us} - h_{ds} + \beta \frac{V_{us}^2}{2g} \right)^{1/2}$$

dengan

K_N : koefisien aliran air keluar.

θ : faktor penyesuaian (umumnya pada angka 0,3).

β : faktor penyesuaian yang bervariasi pada rasio bukaan jembatan.

g : percepatan karena gravitasi.

Y_{ds} : kedalaman hilir jembatan.

V_{us} : kecepatan hulu jembatan.

V_{ds} : kecepatan hilir jembatan.

h_{us} : ketinggian air pada sektor silang bagian hulu.

h_{ds} : ketinggian air pada sektor silang bagian hilir.

b : lebar total bukaan jembatan dengan pengecualian pilar.

Koefisien aliran air keluar K_N bervariasi dengan rasio bukaan jembatan M dan bentuk pilar. Faktor penyesuaian bervariasi dengan rasio bukaan jembatan dan umumnya menggunakan nilai 0,3.

Rasio bukaan jembatan M didefinisikan sebagai perbandingan antara lebar arus pada jembatan dan lebar arus pada hulu jembatan b/B .

b : lebar bukaan lengkungan.

B : lebar bukaan pada sektor silang bagian hulu.

Area struktur didefinisikan sebagai lebar lengkung dikali kedalaman air minimum bagian hulu atau hilir.

2. Pilar Jembatan (Yarnell): sebuah persamaan yang dihasilkan dari percobaan untuk kondisi aliran normal pada jangkauan aliran subkritis. Efek pilar jembatan diperhitungkan melalui penggunaan faktor penyesuaian. Sama halnya dengan persamaan Nagler, persamaan Yarnell juga mempertimbangkan berbagai bentuk pilar yang berbeda-beda (gambar 5.2). Bentuk pilar diperhitungkan melalui koefisien pilar. Persamaan Yarnell dihasilkan berdasarkan eksperimen dengan asumsi aliran bebas. Persamaan Yarnell adalah sebagai berikut:

$$h_{us} - h_{ds} = KY_{ds}F_{ds}^2(K + 5F_{ds}^2 - 0,6)(\alpha + 15\alpha^4)$$

$$F_{ds}^2 = \frac{Q^2}{A_{ds}^2 2g Y_{ds}}$$

$$\alpha = 1 - \frac{b}{B_{us}}$$

dengan

K: koefisien bentuk pilar Yarnell.

g: percepatan karena gravitasi.

Y_{ds} : kedalaman air di hilir jembatan.

F_{ds} : bilangan Froude pada hilir jembatan.

α : perbandingan penyempitan saluran.

A_{ds} : Total area aliran di hilir sektor silang.

b: lebar bukaan jembatan dengan pengecualian pilar.

B_{us} : lebar pada bagian hulu sektor silang.

h_{us} : ketinggian air pada bagian hulu sektor silang.

h_{ds} : ketinggian air pada bagian hilir sektor silang.

Area struktur ditentukan sebagai lebar lengkung dikalikan kedalaman air minimum di bagian hulu atau hilir.

3. Pilar Jembatan (d'Aubuisson): aliran air keluar ditentukan berdasarkan persamaan momentum dengan asumsi tanpa kemiringan dinding sungai dan kehilangan gesekan diabaikan. Metode ini dapat digunakan pada saluran berbentuk persegi dan juga menjadi pilihan untuk saluran menggunakan sektor silang bentuk sembarang.

Persamaan untuk pilar jembatan ini menggunakan asumsi bahwa kemiringan dinding sungai adalah nol dan efek gesekan dinding sungai diabaikan. Terdapat dua alternatif untuk penggunaan persamaan ini:

- Analisis saluran persegi panjang dilakukan untuk lebar saluran bagian hulu yang bernilai positif. Persamaannya adalah sebagai berikut

$$H_2 - H_1 = \frac{Q^2}{2g} \left[\frac{1}{C^2 (b_2 - w_{pilar})^2 h_1^2} - \frac{1}{b_2^2 (h_1 + \Delta h)^2} \right]$$

dengan

Q: aliran air keluar pada pilar jembatan.

H₁: ketinggian air pada hilir pilar.

H₂: ketinggian air pada hulu pilar.

C: konstanta yang ditentukan dari geometri pilar.

b₂: lebar saluran pada bagian hulu pilar.

h₁: kedalaman air pada bagian hilir pilar.

w_{pilar}: lebar total pilar.

- Persamaan momentum yang memperhitungkan efek bentuk sembarang sektor silang:

$$H_2 - H_1 = \frac{Q^2}{2g} \left[\frac{1}{C^2 (A_1 - h_1 w_{pilar})^2} - \frac{1}{A_2^2} \right]$$

dengan

A₁: area sektor silang pada hilir pilar.

A₂: area sektor silang pada hulu pilar.

Catatan: jika bilangan Froude di atas 0,6 maka efek pilar jembatan diabaikan.

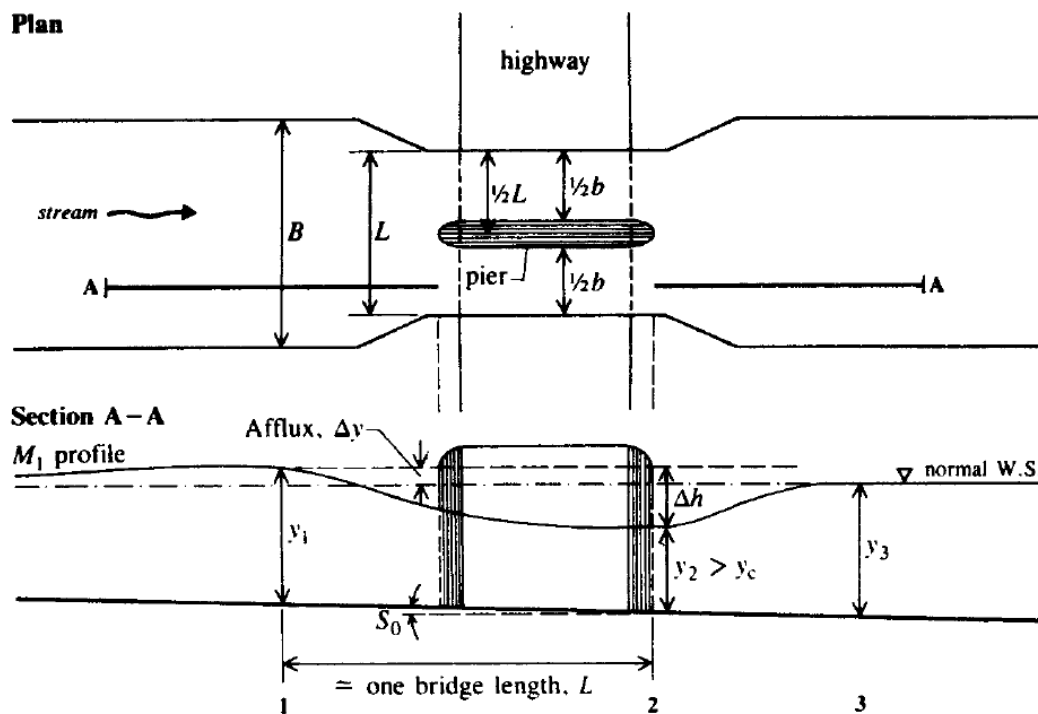
5.1 Penyempitan Aliran karena Adanya Jembatan

Adanya jembatan yang melintang di atas sungai menghasilkan penyempitan aliran yang melalui bukaannya dikarenakan

- Berkurangnya lebar sungai karena pilar dan struktur bawah lainnya, dan
- Penyempitan saluran itu sendiri (pada kasus sungai dengan bentang yang panjang disertai dataran banjir) untuk mengurangi biaya pembangunan struktur.

Selain gerusan lokal di sekitar pilar dan *abutment* jembatan maupun erosi dinding sungai, terdapat efek *backwater* jembatan yang juga harus dipertimbangkan. *Afflux* yang juga timbul (kenaikan tinggi muka air sungai di hulu) bergantung pada tipe aliran (subkritis atau superkritis). Sebagian besar jembatan dirancang untuk kondisi aliran subkritis untuk meminimalkan resiko gerusan dan masalah *choking*, sehingga pembahasan di bawah ini dilakukan untuk aliran subkritis.

- a) Ketinggian Backwater
 - Penyempitan Pendek



Gambar 5-3 Profil Aliran yang melalui Jembatan dengan Penyempitan Saluran (Aliran Subkritis) (*sumber: cross-drainageHydraulic-Structures-Novak*)

Saat aliran yang melewati sektor dengan penyempitan cukup pendek (jembatan sempit tanpa saluran yang dirancang menyempit) dengan hanya beberapa pilar, *backwater* yang ditimbulkan mungkin tidak terlalu bermakna. Mengacu pada gambar 5.3, perubahan ketinggian air, Δh , dapat diperoleh dengan persamaan energi antara sektor 1 dan 2 (Kindsvater, Carter and Tracy, 1953) yaitu

$$\Delta h = K_B V_2^2/2g + S_0L/\sigma - \alpha_1 V_1^2/2g$$

dengan K_B adalah koefisien kehilangan jembatan (Tabel 1), dinyatakan sebagai fungsi dari perbandingan pengangkutan,

$$\sigma = k_b/k_B$$

Tabel 5.5 Koefisien Kehilangan Jembatan, K_B

σ	K_B
1,0	1,00
0,8	1,36
0,6	1,67
0,4	1,88
0,2	1,92

k_b merupakan pengangkutan dari sektor yang berkontraksi dengan kedalaman normal yang sama dan karakteristik kekasaran yang sama pada sektor hulu dengan nilai pengangkutan adalah k_B .

Untuk sektor pada saluran persegi panjang yang tidak menyempit, perbandingan pengangkutan (perbandingan kontraksi, $\alpha = 1 - \sigma$) menjadi b/B , dengan b adalah kedalaman sungai jernih (kedalaman normal, B) di bawah jembatan (gambar 5.3).

Koefisien kehilangan jembatan juga merupakan fungsi dari geometri jembatan, *skew* dan eksentrisitas, dan struktur bangunan atas yang tenggelam di bawah aliran air (contohnya dek).

V_2 adalah kecepatan aliran pada hilir jembatan, menggunakan area di bawah jembatan dengan kedalaman hulu normal yang sama, dan α_1 adalah koefisien koreksi energi sektor tersebut. L diasumsikan sebagai panjang jembatan yang sama (*abutment* ke *abutment*), dan S_0 adalah kemiringan dinding sungai normal lega tanpa halangan.

- Penyempitan Panjang

Untuk jembatan yang memiliki sejumlah pilar besar dan/atau *embankment* panjang yang memperkecil lebar saluran, efek *backwater* menjadi signifikan. Mengacu pada profil aliran yang ditunjukkan pada gambar 5.3, yang melalui sektor kontraksi panjang, Δy adalah afflux yang ditimbulkan oleh adanya pilar dan penyempitan saluran.

Momentum dan persamaan kontinuitas antara sektor 1 dan 3 (asumsikan distribusi tekanan hidrostatik dengan mengabaikan kemiringan dinding sungai dan ketahanan gesekan) menghasilkan persamaan

$$\Delta y/y_3 \cong \left\{ A + \left[A^2 + 12C_D(b/B)Fr_3^2 \right]^{1/2} \right\} / 6$$

dengan

$$A = \{ C_D(b/B) + 2 \} Fr_3^2 - 2$$

Fr_3^2 adalah bilangan Froude ($V_3/(gy_3)^{1/2}$) pada sektor 3.

Dua persamaan di atas bergantung pada nilai estimasi koefisien tarikan C_D yang tepat. Koefisien tarikan pilar merupakan fungsi dari gradien kecepatan aliran, b/B , dan bentuk pilar.

Data percobaan Yarnell's (1934) untuk aliran yang melewati pilar jembatan menghasilkan persamaan empiris di bawah ini:

$$\Delta y/y_3 = KFr_3^2(K + 5Fr_3^2 - 0,6) (\alpha + 15\alpha^4)$$

dengan

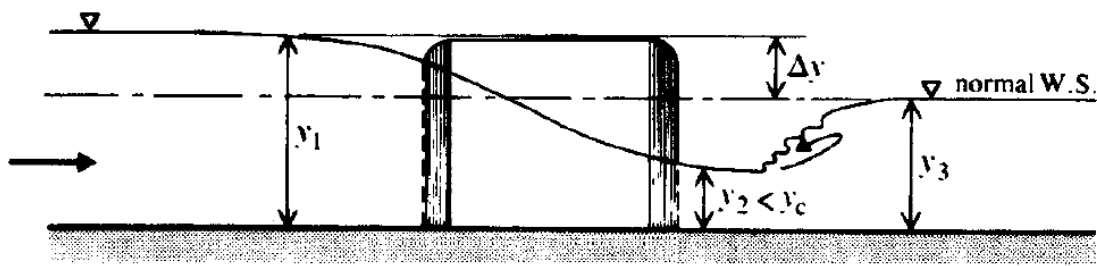
$$\alpha = 1 - \sigma = 1 - b/B$$

dan K adalah fungsi dari bentuk pilar sesuai dengan tabel di bawah ini.

Tabel 5.6 Nilai K sebagai Fungsi dari Bentuk Pilar

Bentuk Pilar	K	Keterangan
Hidung dan ekor semisirkular	0,9	Seluruh nilai dapat diaplikasikan pada pilar dengan perbandingan panjang dan lebar adalah 4.
Hidung dan ekor bentuk-lensa	0,9	
Pilar silinder kembar terkoneksi diafragma	0,95	
Pilar silinder kembar tanpa diafragma	1,05	Hidung dengan bentuk lensa dibentuk dari dua kurva sirkular; tiap radius adalah dua kali lebar pilar dan tiap tangential menghadap wajah pilar.
Hidung dan ekor tiga sudut 90°	1,05	
Hidung dan ekor persegi	1,25	

Jika aliran mengalami *choking* karena kontraksi berlebihan maka nilai *afflux* meningkat tajam (gambar 5.4).



Gambar 5-4 Profil Aliran dengan Kondisi “Choking” (sumber: *cross-drainageHydraulic-Structures-Novak*)

Mengacu pada gambar 5.4, nilai σ terbatas (asumsikan kecepatan seragam pada sektor 2) untuk aliran kritis pada sektor 2 dinyatakan dengan persamaan di bawah ini

$$\sigma = (2 + 1/\sigma)^3 Fr_3^4 / (1 + 2Fr_3^2)^3$$

Pada aliran yang mengalami *choking*, kehilangan energi antara sektor 1 dan 2 dituliskan oleh Yarnell sebagai

$$E_1 - E_2 = C_L V_1^2 / 2g$$

C_L adalah fungsi dari bentuk pilar (setara dengan 0,35 untuk pilar berbentuk ujung-persegi dan 0,18 untuk berujung bulat, untuk perbandingan panjang:lebar pilar adalah 4). Kedalaman air di hulu, y_1 , dapat dihitung, sehingga nilai *afflux* Δy diperoleh dari $y_1 - y_3$.

Jembatan bersudut (*skewed bridges*) menghasilkan *afflux* yang lebih besar, dan Yarnell menemukan bahwa jembatan dengan sudut 10° tidak menghasilkan perubahan *afflux*, sedangkan sudut 20° menghasilkan perubahan nilai *afflux* sebesar 250%.

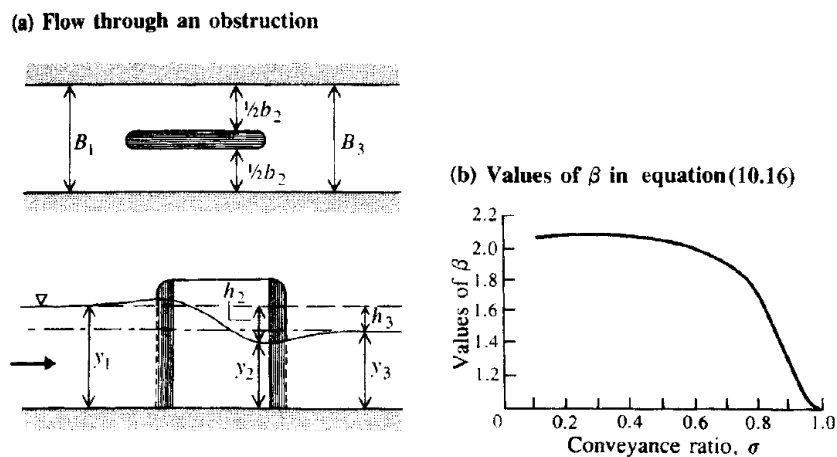
Untuk perhitungan nilai *backwater* jembatan melengkung, Martín-Vide dan Prió (2005) merekomendasikan koefisien *head loss* K untuk jumlah penyempitan dan kehilangan ekspansi sebagai $K = 2,3m - 0,345$, dengan m adalah perbandingan area saluran dan tanpa halangan untuk $0,324 < m < 0,65$.

b) Perhitungan Aliran Air Keluar pada Pilar Jembatan

1. Nagler (1918) mengajukan persamaan untuk menghitung aliran air keluar untuk aliran subkritis dan hampir kritis sebagai berikut:

$$Q = K_N b (2g)^{1/2} (y_3 - \theta V_3^2 / 2g) (h_3 + \beta V_1^2 / 2g)^{1/2}$$

K_N adalah koefisien yang bergantung pada derajat penyempitan jembatan dan karakteristik saluran tanpa halangan (Tabel 3); θ adalah faktor koreksi yang ditujukan untuk mengurangi kedalaman y_3 ke y_2 dan koreksi untuk kecepatan, bergantung pada rasio pengangkutan.



Gambar 5-5 Perhitungan Aliran Air Keluar yang Melalui Halangan (sumber: *cross-drainageHydraulic-Structures-Novak*)

2. d'Aubuisson (1940) menyarankan rumus

$$Q = K_A b_2 y_3 (2gh_3 + V_1^2)^{1/2}$$

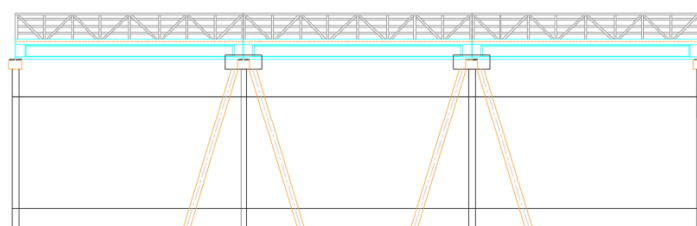
dengan K_A adalah fungsi dari derajat penyempitan saluran dan bentuk maupun orientasi halangan (Tabel 3). d'Aubuisson membuat tanpa perbedaan antara y_3 dan y_2 , sehingga persamaan di atas diketahui sebagai pendekatan karena sebenarnya terdapat perbedaan kecil antara y_3 dan y_2 .

Tabel 5.7 K_N dan K_A

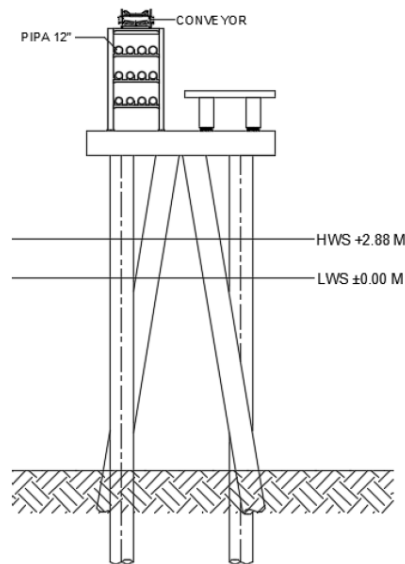
Tipe jembatan	Rasio pengangkutan, σ									
	0,9		0,8		0,7		0,6		0,5	
	K_N	K_A	K_N	K_A	K_N	K_A	K_N	K_A	K_N	K_A
Hidung dan ekor persegi	0,91	0,96	0,87	1,02	0,86	1,02	0,87	1,00	0,89	0,97
Hidung dan ekor semisirkular	0,94	0,99	0,92	1,13	0,95	1,20	1,03	1,26	1,11	1,31
Hidung dan ekor tiga sudut 90°	0,95		0,94		0,92					
Pilar silinder kembar dengan atau tanpa diafragma	0,91		0,89		0,88					
Hidung dan ekor bentuk lensa	0,95	1,00	0,94	1,14	0,97	1,22				

5.2 Trestle

Trestle merupakan jalan/akses (jembatan penghubung) dari dermaga menuju darat dan digunakan untuk menghubungkan daratan dengan dermaga; umumnya bermaterial beton yang dibangun di atas tiang pancang. *Trestle* biasanya dibangun di perairan yang cukup dangkal dan merupakan bagian dari konstruksi *jetty* yaitu jembatan penghubung dari *trestle* sampai ke kepala *jetty* ataupun dermaga. Komponen struktur *trestle* terdiri atas struktur atas yang terdiri dari balok, pelat dan *pilecap*; serta struktur bawah yang terdiri dari tiang pancang. Tampak samping dan tampak depan struktur *trestle* berturut-turut terdapat pada gambar di bawah ini.



Gambar 5-6 Tampak Samping Trestle (sumber: Kevin, et al. 2019)



Gambar 5-7 Tampak Depan Trestle (sumber: Kevin, et al. 2019)

5.2.1 Aliran melalui Pilar *Trestles*

Selama periode 1929 dan 1930 Yarnell melakukan 1082 eksperimen pada aliran air yang melewati pilar *trestle* bersih: *trestle* yang bebas dari *debris*. Eksperimen yang dilakukan juga termasuk sudut aliran air yang bervariasi hingga 30° . Aliran air yang melalui *trestle* dapat dihitung menggunakan persamaan d'Aubuisson dan Nagler.

a) d'Aubuisson

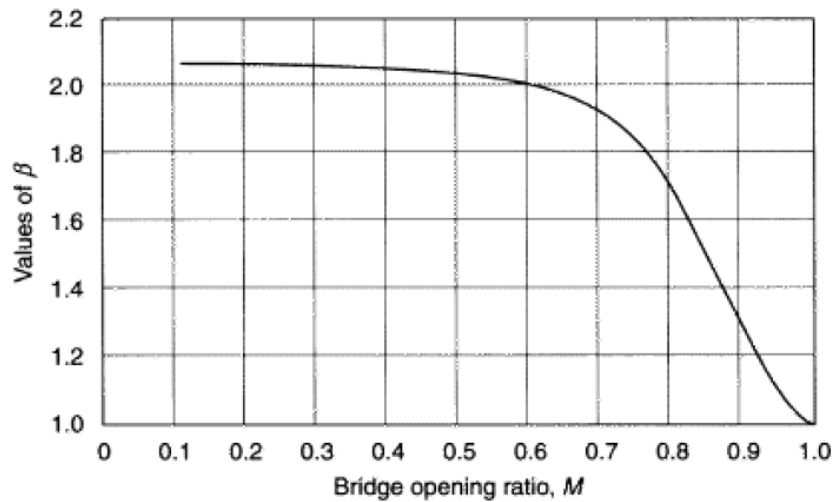
$$Q = K_{Ab} Y_4 (2gH_1^* + V_1^2)^{1/2}$$

Untuk kedalaman normal aliran air keluar (Y_4) dapat dihitung dan H_1^* diperoleh dari hasil coba-coba untuk persamaan di atas. Hasil coba-coba diperlukan karena nilai V_1 bergantung pada H_1^* .

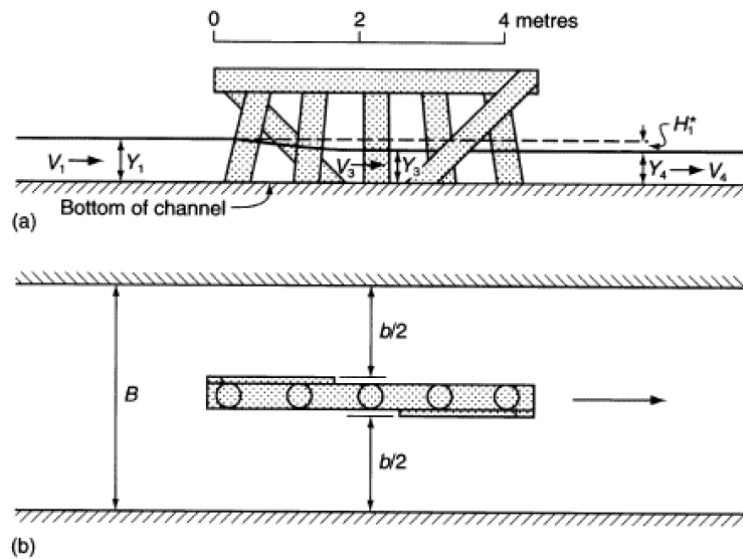
b) Nagler

$$Q = K_{Nb} \sqrt{2g} \left(Y_4 - \theta \frac{V_4^2}{2g} \right) \left(H_1^* - \beta \frac{V_1^2}{2g} \right)^{1/2}$$

Nilai faktor penyesuaian θ dan β dievaluasi secara eksperimen. Umumnya θ ditetapkan 0,3 dan nilai β bervariasi sesuai dengan rasio bukaan (M), ditunjukkan pada gambar 5.8



Gambar 5-8 Nilai β pada Persamaan Nagler untuk Aliran yang Melewati Pilar (sumber: Les Hamill. 1999)



Gambar 5-9 Aliran yang Melalui Batang Pilar Trestle, Yarnell (sumber: Les Hamill. 1999)

Pada perhitungan, jumlah penyempitan saluran yang dihitung diambil sebagai rata-rata diameter pilar ditambah ketebalan tambatan berayun. Koefisien pada tabel di bawah digunakan untuk aliran subkritis (tidak superkritis) tanpa koreksi rasio bukaan jembatan.

Tabel 5.8 Nilai K_A dan K_N untuk Pilar *Trestle*

Penyusunan <i>trestle</i>	K_A	k_N
Tiang-tiang searah dengan arus air		
Tiang <i>trestle</i> 5 pilar jalur tunggal	0,99	0,90
Tiang <i>trestle</i> 10 pilar jalur ganda	0,87	0,82
Tiang <i>trestle</i> 5 pilar dua jalur tunggal secara <i>offset</i>	0,85	0,79
Tiang-tiang dengan sudut terhadap arus air		

Tiang <i>trestle</i> 5 pilar jalur tunggal pada:		
Sudut 10°	0,99	0,90
Sudut 20°	0,96	0,89
Sudut 30°	0,92	0,87

Kesimpulan lain yang didapatkan oleh Yarnell adalah sebagai berikut:

- Secara umum, persamaan d'Aubuisson dan Nagler dapat diaplikasikan dengan sangat baik pada kondisi eksperimen yang melibatkan *trestles*.
- Hingga sudut aliran yang terbentuk melewati 10°, terdapat sedikit penurunan pada koefisien dan aliran air keluar.
- Dengan sudut terhadap aliran air sebesar 30°, koefisien aliran air keluar untuk tiang *trestle* adalah kurang dari 4% dibandingkan tiang yang searah dengan aliran air, sementara *backwater* akan meningkat sebesar 50–70% untuk persilangan jalur tunggal.
- *Trestle* jalur ganda dengan penempatan tiang *offset* terhadap aliran air memberikan halangan lebih besar dibandingkan *trestle* jalur ganda dengan penempatan tiang yang searah aliran air.
- Jika kecepatan dan kedalaman aliran di lapangan lebih besar dibandingkan dengan percobaan maka kesimpulan di atas menjadi tidak dapat diterapkan.

BAB 6 ANALISIS ALIRAN AIR YANG MELUAP DI ATAS *EMBANKMENT*

Embankment merupakan salah satu infrastruktur yang dibangun di sepanjang sungai dengan tujuan untuk melindungi area sekitar dari banjir dan inundation. Umumnya, material *embankment* adalah tanah yang diperoleh dari tempat galian. Tinggi *embankment* dirancang berdasarkan ketinggian muka banjir. Permasalahan yang umum ditemukan terkait dengan *embankment* sungai yaitu longsor yang disebabkan oleh beberapa faktor. Erosi *toe embankment* dan *rapid drawdown* adalah penyebab utama yang sering ditemukan. Untuk melindungi struktur *embankment*, proteksi buatan maupun alami dapat dilakukan. *Gabion*, *geo textile*, *rip rap*, dan sebagainya merupakan proteksi buatan yang paling umum diaplikasikan pada *embankment*, sedangkan penanaman vegetasi dengan tipe spesifik dapat diterapkan pada lokasi tertentu.

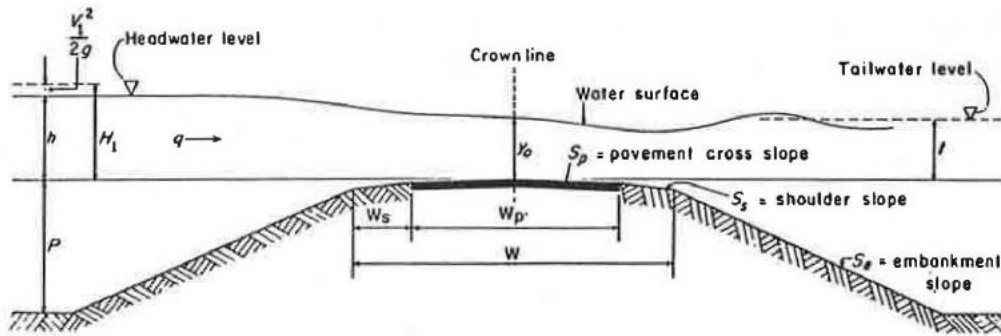
6.1 Pola Aliran Hidrolika yang Meluap di atas *Embankment*

Pemahaman mengenai hidrolika aliran air yang meluap di atas *embankment* memberikan pengertian dasar mengenai proses erosi yang terjadi pada *embankment*. Pola aliran yang bervariasi dapat diamati ketika air mengalir kemudian meluap di atas *embankment*. Penelitian komprehensif mengenai materi ini dapat ditemukan pada jurnal *water supply* USGS oleh Kindsvater. Untuk kondisi *tailwater* rendah yang dikenal sebagai aliran bebas, kedalaman kritis terjadi pada puncak *embankment*, dan aliran air keluar tergantung pada *head* di hulu sungai. Pada ketinggian *tailwater* yang lebih tinggi, ketika kedalaman aliran yang meluap di atas puncak lebih besar dari kedalaman kritis, aliran air keluar dikontrol oleh *tailwater* dan *headwater*. Di bawah kondisi *tailwater* yang terkontrol, aliran air biasanya terbenam. Seiring dengan meningkatnya ketinggian *tailwater*, perubahan dari aliran bebas menjadi aliran terbenam terjadi tiba-tiba. Pola aliran sebelumnya menuju transisi digambarkan sebagai aliran terbenam mula-mula.

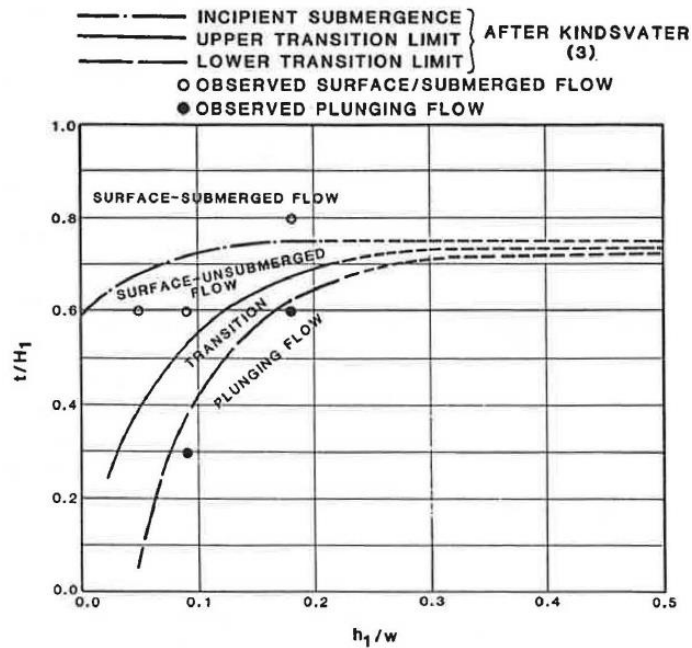
Pola aliran yang meluap di atas *embankment* diklasifikasikan oleh Kindsvater menjadi aliran terjun bebas, aliran permukaan bebas, dan aliran terbenam. Aliran terjun terjadi ketika semburan air terjun di bawah permukaan *tailwater*, menghasilkan loncatan hidrolis terbenam pada kemiringan hilir sungai. Aliran permukaan terjadi ketika semburan air terpisah dari permukaan jalur sungai pada sisi bahu hilir sungai dan “menumpang” hingga meluap di atas permukaan *tailwater*. Aliran bebas dapat berupa terjunan atau aliran permukaan, sedangkan aliran terbenam selalu berupa aliran permukaan. Aliran terjun umumnya menyebabkan erosi *embankment* lebih besar dibandingkan aliran permukaan.

Kindsvater memberikan diagram untuk menentukan pola aliran yang meluap di atas *embankment*. Gambar 1 menunjukkan variabel yang digunakan pada diagram dan gambar 2 menunjukkan rangkuman dari batasan aliran terbenam mula-mula dan batasan transisi aliran bebas untuk permukaan

dengan kekasaran *screen-wire*. Gambar 2 dapat diaplikasikan untuk penentuan batas transisi antara aliran permukaan dan terjunan untuk *embankment* berskala besar.



Gambar 6-1 Variabel utama untuk menggambarkan aliran meluap di atas *embankment* (sumber: Chen, Y. H and Anderson, B. A. 1987)



Gambar 6-2 Rangkuman aliran terbenam mula-mula dan batasan transisi aliran bebas (sumber: Chen, Y. H and Anderson, B. A. 1987)

6.2 Persamaan Aliran Air Keluar untuk Aliran yang Meluap di atas *Embankment*

Persamaan yang menghitung aliran air keluar yang meluap di atas *embankment* untuk kondisi aliran bebas adalah

$$q = C H_1^{3/2}$$

dengan

q = aliran air keluar per unit lebar

C = koefisien aliran air keluar

H_1 = total kepala di atas puncak *embankment* seperti terlihat pada gambar 1

Dengan menggunakan data Kindsvater untuk permukaan jalur sungai halus, Bradley menggunakan gambar 2 untuk menentukan koefisien aliran air keluar. Untuk menentukan aliran air keluar yang meluap di atas jalur sungai, dengan kedalaman (W), pada gambar 2 temukan H_1/W pada diagram B dan nilai koefisien aliran air keluar untuk aliran bebas C, dapat diperoleh. Jika nilai H_1/W kurang dari 0,15; maka nilai C dapat dibaca langsung dari diagram A pada gambar yang sama. Jika aliran terbenam terjadi (misalnya t/H_1 lebih besar dari 0,7); masukkan nilai aliran terbenam dalam % pada diagram C dan temukan skala faktor aliran terbenam C_s/C . Aliran air keluar kemudian dihitung menggunakan nilai pengganti pada persamaan di bawah ini:

$$Q = C L H^{3/2} \frac{C_s}{C}$$

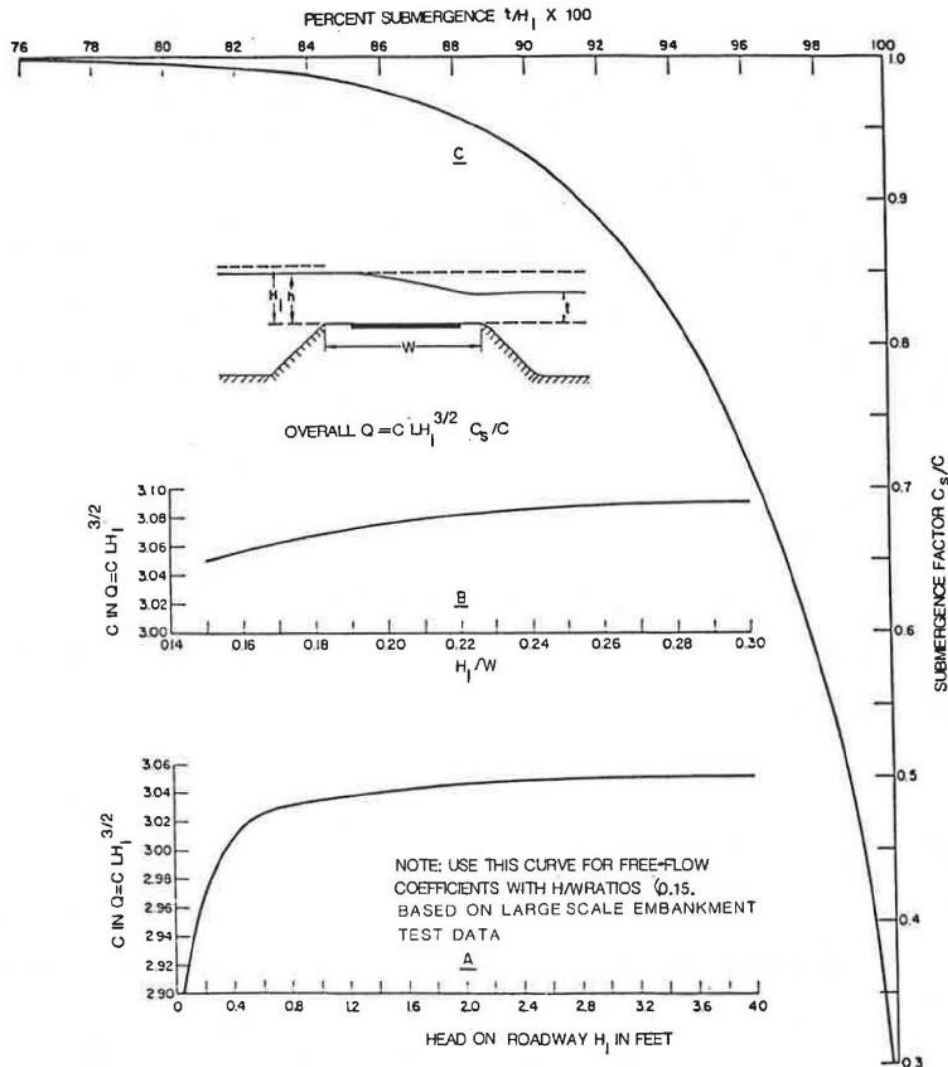
dengan

L: panjang jalur sungai yang terendam,

H_1 : total *head* hulu sungai yang diukur terhadap *crown* jalur sungai,

C dan C_s : koefisien aliran air keluar untuk aliran bebas dan aliran terbenam.

Jika kedalaman air yang meluap di atas *embankment* bervariasi di sepanjang jalur sungai, disarankan untuk memisahkan bagian yang terendam menjadi beberapa segmen dan menghitung aliran air keluar yang meluap di atas *embankment* pada tiap segmen secara terpisah.



Gambar 6-3 Koefisien aliran air keluar untuk aliran yang meluap di atas *embankment* (sumber: Chen, Y. H and Anderson, B. A. 1987)

Kemiringan *embankment* mempengaruhi kecepatan aliran dan karakteristik hidrolika sumbu horizontal *stationary rollers* yang mempengaruhi perkembangan *embankment* di sisi hilir sungai.

6.3 Zona Aliran

Aliran yang meluap di atas *embankment* dengan sedikit atau tanpa *tailwater* akan melalui tiga zona:

- dari *head* berenergi statis menuju kombinasi *head* berenergi statis dan dinamis, aliran mengalir dari *reservoir* tenang menuju kecepatan subkritis melewati puncak *embankment* pada bagian hulu sungai;
- aliran melalui kedalaman kritis pada puncak akan menghasilkan aliran superkritis melewati bagian puncak *embankment* yang tersisa menuju persimpangan dengan kemiringan *embankment* pada bagian hilir sungai; dan
- aliran turbulen superkritis pada kemiringan hilir sungai.

Gambar 3 memberikan definisi berupa sketsa untuk ketiga zona.

1. Zona Pertama – aliran subkritis yang meluap di atas *puncak embankment*.

Zona pertama aliran menunjukkan elevasi permukaan air hampir setara dengan ketinggian *reservoir* yang tenggelam karena kecepatan *head*, $V^2/2g$. Permukaan air yang tenggelam pada kedalaman kritis ini akan setara dengan sepertiga *overtopping head*, H_1 , ditambah kehilangan gesekan di sepanjang puncak, tetapi kehilangan gesekan pada zona ini biasanya diabaikan.

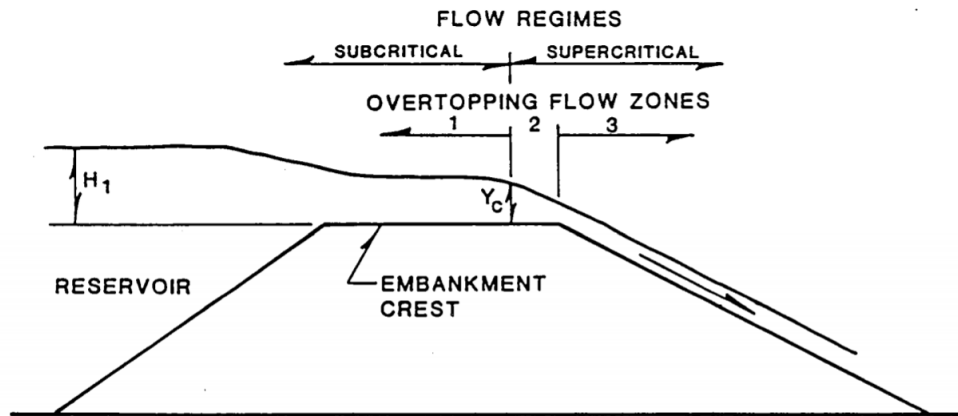
Lokasi kedalaman kritis pada puncak *embankment* tergantung pada profil puncak. Bila puncak berbentuk bulat, titik kedalaman kritis akan berada dekat garis tengah puncak. Bila puncak memiliki kemiringan berlawanan menuju arah hilir sungai, titik kedalaman kritis akan berada dekat ujung puncak menuju arah hilir sungai. Bila puncak memiliki kemiringan positif menuju arah hilir sungai, titik kedalaman kritis akan berada dekat ujung puncak ke arah hulu sungai. Lokasi kedalaman kritis juga bervariasi dengan *overtopping head*; lokasi tersebut akan bergeser ke arah hulu sungai seiring dengan bertambahnya *overtopping head*.

2. Zona Kedua – aliran superkritis yang meluap di atas puncak *embankment*.

Zona kedua aliran terjadi melewati bagian puncak pada lokasi kedalaman kritis yang menuju hilir sungai, dan termasuk aliran superkritis. Seperti zona pertama, panjang zona ini tergantung pada rancangan puncak. Terdapat sedikit perubahan pada kedalaman aliran dan kecepatan di zona ini karena jarak yang pendek. Kedalaman kritis pada titik ini akan setara dengan dua pertiga *overtopping head*, H_1 , dan kecepataannya akan setara dengan $(gY_c)^{1/2}$; dengan g adalah percepatan karena gravitasi dan Y_c setara dengan kedalaman kritis.

3. Zona Ketiga – aliran superkritis pada kemiringan *embankment* menuju arah hilir sungai.

Zona ketiga berada pada kemiringan *embankment* menuju arah hilir sungai. Kondisi aliran akan superkritis karena kemiringan pada *embankment* dan turbulensi tinggi karena kekasaran permukaan. Akan terjadi peningkatan bertahap pada udara yang terperangkap di turunan kemiringan; dan aliran akan menjadi terperangkap sepenuhnya dengan udara dan menghasilkan penampakan air yang putih jika permukaan kemiringan kasar dan panjangnya memadai. Koreksi diperlukan untuk membuat sudut kemiringan dan udara terperangkap. Kedalaman aliran harus dikoreksi untuk pengaruh sudut kemiringan pada perhitungan gaya gravitasi. Koreksi ini dibuat dengan cosin sudut kemiringan yaitu, $h = y \cos \theta$.



Gambar 6-4 Zona aliran hidrolika dan aliran yang meluap di atas *embankment* (sumber: Chen, Y. H and Anderson, B. A. 1987)

Faktor lain yang harus dipertimbangkan pada analisis hidrolika untuk aliran yang meluap di atas *embankment* adalah zona tekanan negatif yang dapat terbentuk pada kemiringan *embankment* yang menuju hilir sungai. Aliran di sepanjang puncak *embankment* membentuk sejumlah momentum pada arah horizontal. Momentum ini akan berlanjut dengan membawa aliran keluar meluap di atas kemiringan pada jarak yang menuju hilir sungai sebagai fungsi dari geometri *embankment* dan kecepatan aliran. Dengan menggunakan persamaan gerakan proyektil, maka momentum dapat dihitung sebagai berikut:

$$y = \left(\frac{-g}{2V_0^2} \right) x^2$$

dengan

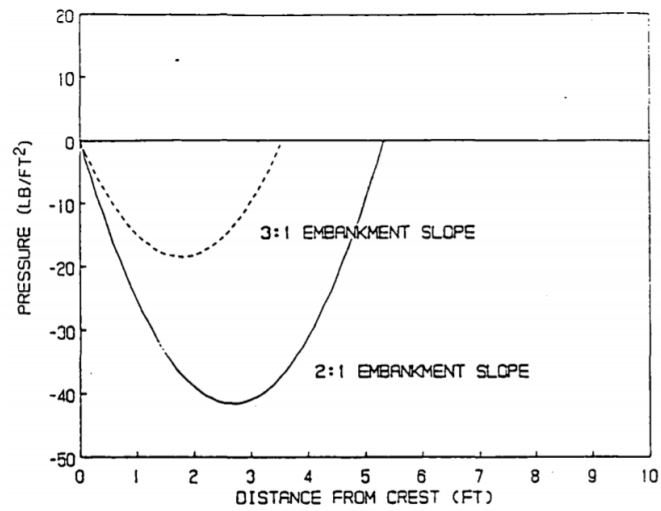
V_0 : kecepatan aliran pada arah horizontal pada titik transisi kemiringan,

x dan y : koordinat kartesius yang bermula pada titik transisi kemiringan.

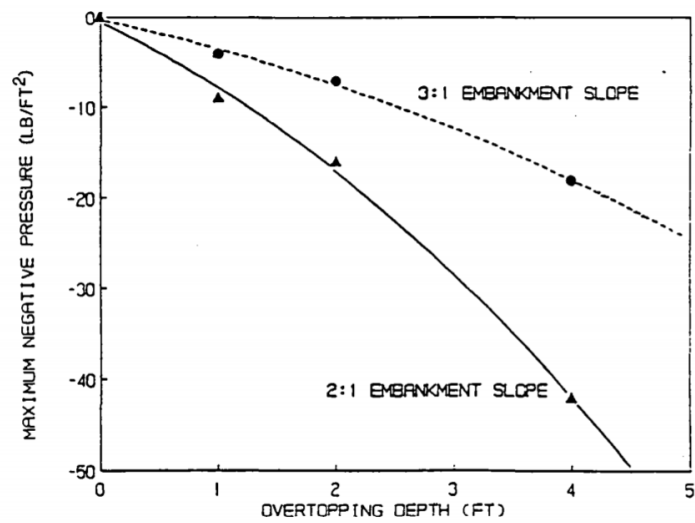
Analisis dilakukan menggunakan persamaan di atas dan menggunakan gambar 5 dan 6, yang menghasilkan estimasi angka-angka serupa dengan analisis grafis dengan *ogee crest nomographs*.

Kesimpulan yang didapat dari analisis ini yaitu:

- Semakin miring kemiringan *embankment*, semakin bertambah besaran tekanan negatif yang muncul.
- Semakin besar *overtopping head*, semakin bertambah besaran tekanan negatif yang timbul.



Gambar 6-5 Distribusi tekanan teoritis pada kemiringan di hilir sungai terhadap aliran yang meluap di atas *embankment* setinggi 4 kaki (sumber: *Simons, Li & Associates, Inc. 1988*)



Gambar 6-6 Variasi tekanan teoritis negatif maksimum yang terbentuk pada variasi kedalaman aliran air yang meluap di atas *embankment* (sumber: *Simons, Li & Associates, Inc. 1988*)

BAB 7 MENINGKATKAN EFISIENSI HIDROLIKA ALIRAN AIR YANG MELALUI JEMBATAN

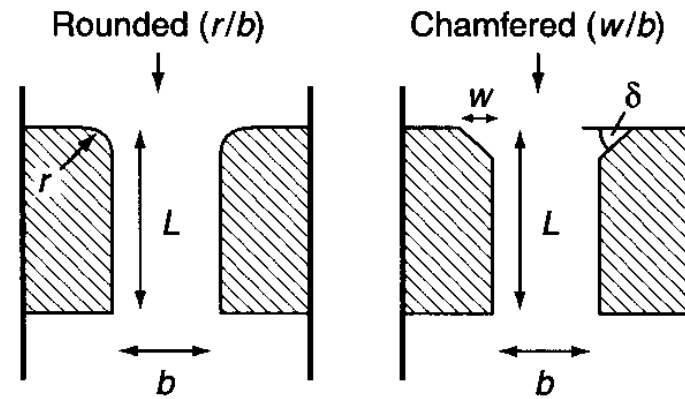
Beberapa metode untuk meningkatkan efisiensi hidrolika diperlukan pada tahap perancangan aliran air keluar yang melalui jembatan. Metode-metode tersebut diperlukan untuk meningkatkan aliran air keluar, yang berasal dari ketinggian air di hulu, melalui jembatan atau untuk mengurangi potensi gerusan pada jembatan. *Entrance rounding*, *wingwall* dan *channel improvement* umumnya merupakan metode yang banyak digunakan untuk meningkatkan aliran air yang melalui jembatan. Penjelasan di bawah ini akan menjabarkan mengenai penggunaan *entrance rounding*, *wingwall*, dan *channel improvement* melalui beberapa jurnal penelitian yang berkaitan.

7.1 *Entrance Rounding*

Menurut penjelasan Hamill, salah satu metode untuk meningkatkan efisiensi hidrolika bukaan jalan air adalah dengan membentuk bulat ujung saluran dari hulu aliran air masuk hingga hilir aliran air keluar sehingga geometrinya mendekati bentuk *boundary streamlines*. Maka, ukuran kontraksi awal dan kehilangan energi dapat berkurang. *Entrance rounding* dapat menurunkan ketinggian air pada awal aliran air melewati jembatan dan secara simultan meningkatkan aliran air yang meninggalkan jembatan. *Entrance rounding* mengurangi kontraksi pada *soffit* sehingga lebih banyak bukaan yang digunakan, kecepatan rata-rata semburan air lebih rendah, dan distribusi kecepatan lebih seragam: *head loss* lebih kecil. Secara umum, *entrance rounding* mengurangi kecepatan aliran pada bukaan jembatan sehingga gerusan pada jalan air dan saluran hingga menuju hilir sungai juga dapat berkurang. *Entrance rounding* mengurangi kontraksi *live stream* dan meningkatkan lebar *vena contracta*, sehingga meningkatkan koefisien aliran air keluar, C_d pada persamaan air keluar. Hal ini berarti bahwa jembatan dapat dilalui debit banjir yang lebih besar pada ketinggian air yang sama.

$$Q = C_{da_w} \left[2g \left(Y_u - \frac{z}{2} + \frac{a_u V_u^2}{2g} \right) \right]^{1/2}$$

Alternatif untuk jalan masuk air yang bulat adalah dengan menggunakan *chamfer (bevel)*, dengan keuntungan yaitu mudah dalam penerapannya (serupa dengan *wingwall* bersudut). Derajat *chamfer* adalah sudut (δ) dan panjangnya adalah w/b .



(d) Entrance rounding

Gambar 7-1 *Entrance Rounding*: Salah Satu Variabel Hidrolika yang Mempengaruhi Performa Hidrolika Jembatan, (sumber: Les Hamill, 1999)

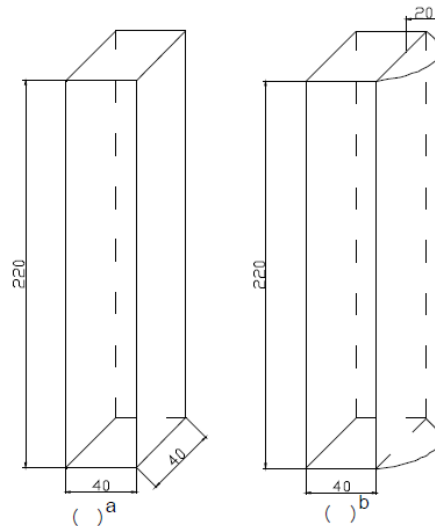
Judul Jurnal: Efektivitas Bentuk Abutmen terhadap Gerusan di Sekitar *Abutment* Jembatan

Jembatan umumnya dibangun pada posisi melintang arah aliran sungai sehingga aliran sungai harus dipertimbangkan dalam proses perancangan jembatan. Hal ini dikarenakan kegagalan struktur jembatan sering disebabkan oleh ketidakstabilan dasar sungai yang menimbulkan gerusan lokal di pilar maupun *abutment* jembatan.

Proses gerusan pada *abutment* jembatan terjadi karena aliran air yang terhambat oleh *abutment*. Hal ini mengakibatkan terlepasnya sedimen tanah, lalu sedimen tersebut terangkut aliran air dan menyebabkan proses degradasi dasar saluran.

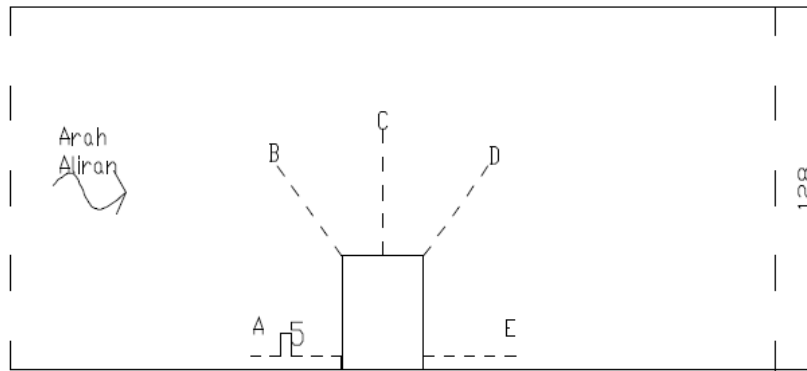
Gerusan lokal di sekitar *abutment* jembatan dapat diminimalkan. Salah satu cara yang dapat diterapkan untuk mengurangi gerusan di sekitar *abutment* jembatan adalah merancang geometri *abutment* sedemikian rupa, sehingga dapat memberikan bentuk aliran yang paling kecil pengaruhnya terhadap gerusan di *abutment*.

Abutmen jembatan menggunakan variasi model berbentuk *vertical wall abutment* dan *semi-circular-end abutment*, berturut-turut seperti tampak pada gambar 2 (a) dan (b).



Gambar 7-2 Model *Abutment* Jembatan (*sumber: Purnomo, S. N, et al. 2016*)

Untuk mengetahui efektifitas geometri *abutment* jembatan terhadap gerusan lokal, maka dilakukan simulasi pada 2 buah model *abutment* jembatan, yaitu *vertical wall abutment* dan *semi – end – circular abutment*, yang diletakkan pada hamparan sedimen untuk 3 variasi debit (*clear water condition*) sebesar 0,45 L/det, 0,51 L/det, dan 0,79 L/det di bagian hulu *flume*, kemudian perubahan elevasi di sekitar *abutment* diukur menggunakan alat ukur digital Thomson. Sedimen menggunakan *movable bed* yang berasal dari pasir yang lolos ayakan No. 20, dan tertahan pada ayakan 200, serta memiliki $D_{30} = 0,26$ mm, $D_{50} = 0,38$ mm, dan $D_{90} = 0,97$ mm. Sedimen dihamparkan sepanjang 2 m dengan ketebalan 7 cm, dan model *abutment* diletakkan di tengah hamparan sedimen. Hasil simulasi menunjukkan bahwa model *vertical wall abutment* memberikan kedalaman gerusan yang lebih dalam pada debit simulasi terbesar jika dibandingkan dengan model *semi – end – circular abutment*, dengan kedalaman gerusan berturut-turut sebesar -2,35 cm dan -2,12 cm. Untuk pola gerusan lokal, gerusan yang terjadi pada model *vertical wall abutment* hanya terjadi pada arah c, sedangkan pada model *semi – end – circular abutment* terjadi pada arah a dan c. Untuk itu, model *semi – end – circular* lebih efektif mengurangi kedalaman gerusan, namun menghasilkan pola gerusan yang lebih banyak.

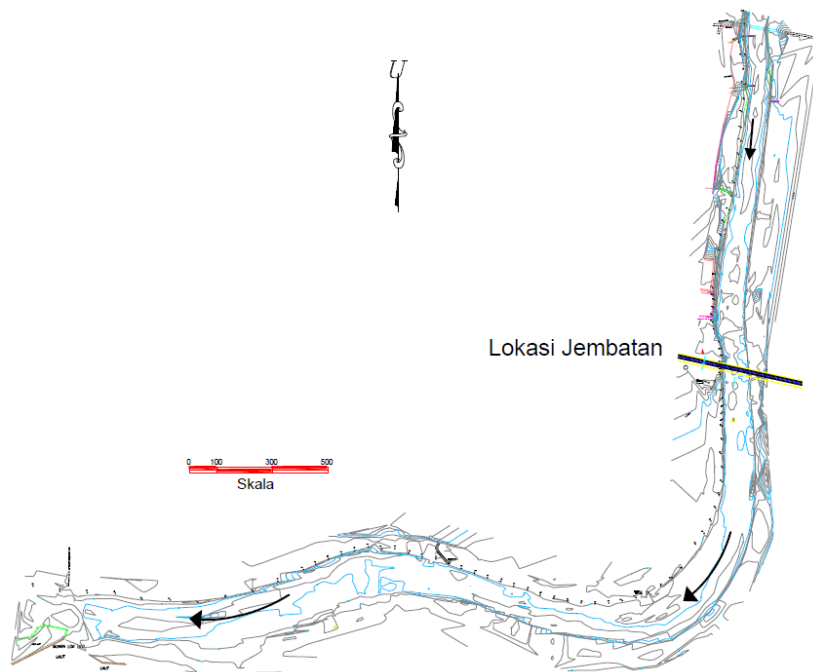


Gambar 7-3 Tampak Atas Layout Pengukuran Kontur Simulasi (sumber: Purnomo, S. N, et al. 2016)

7.2 Channel Improvement

1) Judul Jurnal: Pencegahan Gerusan Tebing pada Jembatan di Sungai Luk Ulo, Kebumen – Jawa Tengah

Rencana pembangunan jembatan baru di ruas Sungai Luk Ulo hilir, Kebumen – Jawa Tengah lebih mempertimbangkan trase jalan baru yang sedang dibangun dan belum mempertimbangkan kondisi hidraulik dan morfologi sungai di sekitarnya. Sedangkan, sungai merupakan saluran natural yang bersifat dinamis dan akan memberikan respon jika terjadi gangguan pada lingkungan sekitarnya. Gangguan dapat berupa kejadian alamiah maupun rekayasa yang dilakukan manusia. Adanya jalan dan jembatan, baik yang telah lama dibangun maupun pembangunan baru yang berbatasan langsung dengan sungai, akan berpengaruh dan dipengaruhi oleh perilaku hidraulik dan perkembangan morfologi sungai. Secara umum lokasi rencana jembatan berada pada segmen sungai yang relatif lurus, sedikit tikungan akibat adanya gerusan lokal yang berpotensi menggerus tebing tepat di udik bagian kanan lokasi jembatan.



Gambar 7-4 Layout Sungai Luk Ulo Segmen Hilir (sumber: Lestari, S. 2011)

Analisis masalah dalam penelitian ini dilakukan dengan pemodelan numerik dan perhitungan teoretis. Tahap pertama identifikasi potensi gerusan akibat degradasi dasar sungai menggunakan analisis numerik 1D dan tahap kedua identifikasi potensi gerusan tebing di sekitar lokasi jembatan menggunakan analisis numerik 2D.

Analisis numerik 1D dilakukan dengan menggunakan *software* MIKE 11 (DHI Water & Environment, 2003) untuk melihat kecenderungan perubahan dasar sungai di lokasi studi. Sedangkan analisis numerik 2D dilakukan untuk melihat kecenderungan gerusan samping / tebing, terutama di sekitar lokasi rencana jembatan dengan menggunakan *software* MIKE 21C (DHI Water & Environment, 2004).

A. Analisis model numerik 1D

Parameter masukan (*input*) untuk batas udik model adalah debit dominan hasil pencatatan muka air / debit yang telah dilakukan. Debit dominan yang terjadi di Sungai Luk Ulo adalah $Q = 91,39 \text{ m}^3/\text{det}$, sedangkan untuk batas hilir dimasukkan parameter elevasi muka air sebagai fungsi debit. Diameter butir material dasar sungai hasil pengukuran dijadikan sebagai parameter masukan dalam perhitungan analisis perubahan dasar sungai (sesuai lokasi / segmen sungai).

Dari analisis yang telah dilakukan, didapatkan gambaran kondisi muka air dan kecenderungan perubahan dasar sungai yaitu untuk debit dominan, kondisi elevasi dasar sungai di lokasi studi (dari jembatan nasional Kebumen – Gombong) sampai muara relatif stabil (tidak banyak terjadi perubahan

atau penurunan). Dengan memperhatikan hasil analisis tersebut maka dapat dikatakan bahwa lokasi jembatan relatif aman terhadap potensi gerusan lokal akibat degradasi dasar sungai.

B. Analisis model numerik 2D

Dilakukan dua skenario pemodelan, yaitu kondisi eksisting dan kondisi penanggulangan. Kedua skenario pemodelan tersebut kemudian dicoba untuk kondisi debit banjir dominan ($Q = 91,39 \text{ m}^3/\text{det}$) dan debit banjir maksimum yang pernah terjadi ($Q = 400 \text{ m}^3/\text{det}$).

- Analisis kondisi eksisting

Skenario kondisi eksisting dilakukan untuk melihat kecenderungan perkembangan morfologi sungai jika tidak dilakukan upaya penanggulangan, sedangkan skenario kondisi penanggulangan dilakukan dengan menambahkan bangunan pengarah arus air (krib) untuk mengurangi potensi gerusan di tebing sungai. Dari hasil analisis kondisi eksisting terlihat bahwa untuk debit dominan, kecepatan di sepanjang Sungai Luk Ulo relatif rendah sehingga dapat dikatakan potensi gerusan tebing relatif kecil. Namun untuk debit besar, terlihat di lokasi rencana jembatan menunjukkan potensi gerusan yang besar, terutama pada tebing kanan. Potensi gerusan makin besar seiring dengan besarnya debit banjir yang terjadi. Hal ini juga diperkuat dengan kondisi lapangan yang menunjukkan adanya gerusan tebing di sisi kanan di sekitar lokasi rencana jembatan.

- Analisis kondisi penanggulangan

Penanggulangan yang dilakukan pada skenario ini adalah dengan memasang bangunan pengarah arus (krib) di sisi kanan udik lokasi rencana jembatan untuk mengarahkan arus air menjauhi tebing kanan sungai. Dari hasil beberapa kali percobaan tata letak krib, untuk meminimalkan potensi gerusan tebing di sekitar lokasi jembatan, diperlukan paling tidak 2 buah krib dengan susunan berjenjang dengan jarak $\pm 100 \text{ m}$. Dari hasil analisis tersebut terlihat bahwa baik untuk debit air rata-rata maupun debit besar potensi gerusan pada tebing kanan sungai di sekitar lokasi rencana jembatan sudah jauh berkurang dengan kecenderungan berpindah ke tengah. Pola aliran yang terbentuk akibat pemasangan susunan krib berubah dari semula terkonsentrasi ke tebing kanan sungai berubah ke tengah sungai. Dari hasil tersebut juga terlihat bahwa perubahan pola aliran yang terjadi tidak berpotensi juga terhadap gerusan tebing di sisi kiri sungai. Berdasarkan analisis tersebut dapat dikatakan bahwa sistem krib yang dipasang di udik lokasi rencana jembatan cukup efektif dalam mengamankan struktur rencana jembatan, terutama terhadap bahaya gerusan tebing.

2) Judul Jurnal: Analisis Perkuatan Bangunan Bawah Jembatan dengan *Rip-Rap*

Jembatan eksisting di Indonesia yang dibangun pada tahun 1980-an umumnya secara desain kurang memperhatikan bentuk morfologi aliran sungai. Hal ini berdampak pada jembatan yang dibangun di lokasi sungai mengalami keruntuhan akibat rusaknya pilar. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui terjadinya potensi gerusan aliran sungai pada pilar jembatan eksisting yang terjadi dalam periode waktu tertentu. Untuk menghindari terjadinya kerusakan struktur jembatan akibat bencana banjir maupun gerusan aliran sungai perlu dilakukan usaha-usaha pemeriksaan dan perkuatan struktur jembatan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis jenis perkuatan pada Jembatan Cipamingkis dan Jembatan Cipunegara terhadap bahaya banjir maupun gerusan aliran sungai.



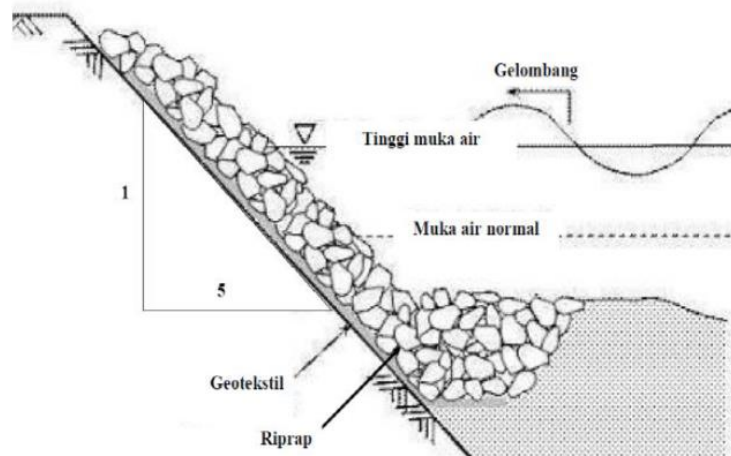
Gambar 7-5 Kondisi Jembatan Cipamingkis Setelah Perbaikan (Pusjatan 2018) (sumber: Setiati, N. R dan Kurniawati, E. 2021)



Gambar 7-6 Kondisi Pilar Jembatan Cipunegara (Pusjatan 2019) (sumber: Setiati, N. R dan Kurniawati, E. 2021)

Struktur Jembatan Cipunegara identik dengan Jembatan Cipamingkis, yaitu terdapat satu pilar pada lokasi sungai. Pada Gambar 2, dapat dilihat bahwa terdapat satu pilar yang terletak pada sepertiga panjang jembatan. Sedangkan pada Gambar 3, saat terjadi luapan air sungai maka akan timbul olakan (pusaran air) di sekitar pilar. Pusaran air tersebut berdampak pada timbulnya gerusan lokal. Oleh karena itu, perkuatan di sekitar pilar perlu dilakukan baik dengan pemasangan bronjong ataupun *rip-rap*. *Rip-rap* merupakan susunan bongkahan batu alam atau blok-blok beton buatan dengan ukuran dan volume tertentu yang digunakan sebagai tambahan peredam energi di hilir bendung/jembatan. *Rip-rap* berfungsi pula sebagai lapisan perisai untuk mengurangi kedalaman penggerusan setempat dan

untuk melindungi tanah dasar di hilir peredam energi bendung/jembatan. Pada jembatan, *rip-rap* digunakan sebagai metode perlindungan dari gerusan lokal di sekitar pilar dan kepala jembatan. Menurut penelitian yang sudah dilakukan oleh Rustiati (2007), perkuatan kepala jembatan terhadap gerusan dengan *rip-rap* dapat mengurangi efek erosi pada aliran dan pusaran tumit kuda (*horse shoes vortex*).



Gambar 7-7 Skema Penanganan Gerusan pada Kepala Jembatan dengan *Rip-Rap* (sumber: Setiati, N. R dan Kurniawati, E. 2021)

Rip-rap bukan merupakan pelindung permanen terhadap jembatan, tetapi merupakan pelindung terhadap potensi gerusan pada pilar jembatan. Persyaratan perencanaan *rip-rap* adalah sebagai berikut:

- Tebal lapisan *rip-rap* yang membentang secara horizontal sedikitnya dua kali lebar pilar, yang diukur dari muka pilar;
- Bagian atas lapisan *rip-rap* ditempatkan pada elevasi yang sama dengan dasar sungai. Semakin dalam *rip-rap* ditempatkan ke dalam dasar sungai, semakin kecil kemungkinan *rip-rap* bergerak;
- Disarankan untuk menempatkan bagian atas lapisan *rip-rap* pada elevasi yang sama dengan dasar sungai;
- Tebal lapisan *rip-rap* harus tiga kali ukuran diameter batu (D_{50}) atau lebih.

Geotekstil atau lapisan pasir/kerikil harus digunakan untuk menstabilkan *rip-rap*.

Ukuran partikel *rip-rap* pada pilar jembatan ditentukan dengan rumus (Richardson, 1990):

$$D_{50} = \frac{0,692(V_{des})^2}{(s_g - 1)2g}$$

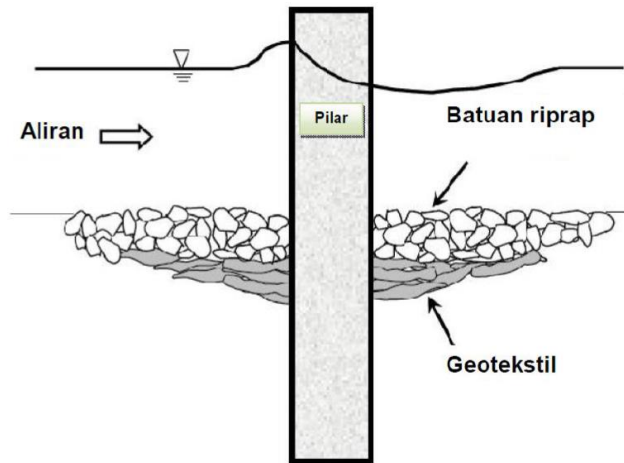
Keterangan:

D_{50} : ukuran partikel 50% lebih halus berdasarkan beratnya (m)

V_{des} : kecepatan desain untuk kondisi lokal pada pilar (m/s)

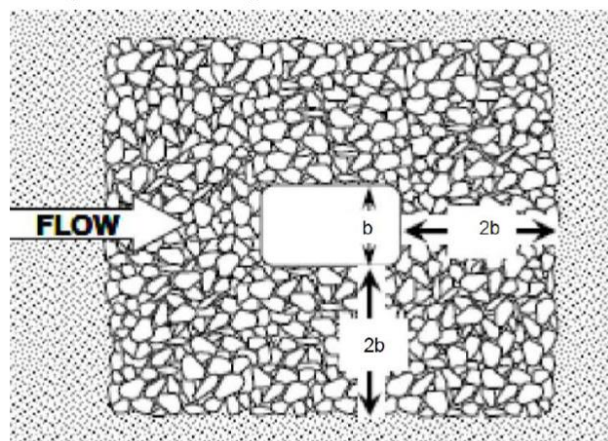
S_g : berat jenis *rip-rap* (biasanya diambil 2,65)

G: percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$).



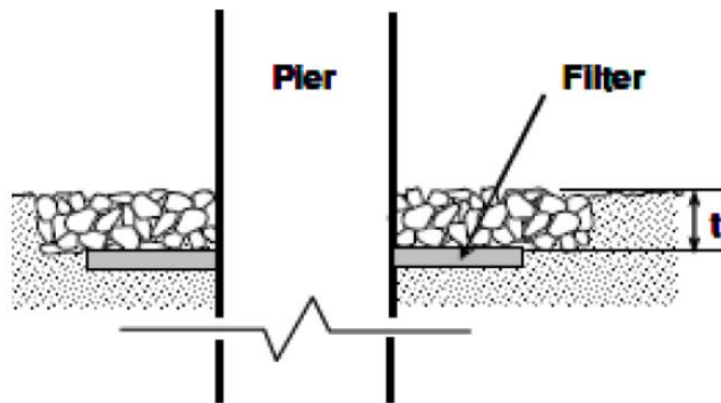
Gambar 7-8 Sketsa Perkuatan Pilar dengan *Rip-Rap* (sumber: Setiati, N. R dan Kurniawati, E. 2021)

Berdasarkan hasil analisis penanggulangan gerusan pada pilar jembatan ditemukan bahwa kedalaman gerusan yang terjadi pada pilar Jembatan Cipamingkis sebelum diperkuat dengan *rip-rap* adalah 5,03 meter. Setelah diperkuat dengan *rip-rap*, kedalaman gerusan menjadi 2,01 meter. Adanya penanganan gerusan dengan *rip-rap* pada pilar Jembatan Cipunegara maka kedalaman gerusan berkurang dari 7,06 meter menjadi 2,56 meter. Penanganan pilar dengan menggunakan *rip-rap* harus memenuhi spesifikasi dan standar ukuran butiran batuan. Pemasangan *rip-rap* pada pilar Jembatan Cipunegara dan Cipamingkis dapat mengurangi terjadinya proses gerusan sebesar 60% sampai dengan periode 100 tahun.



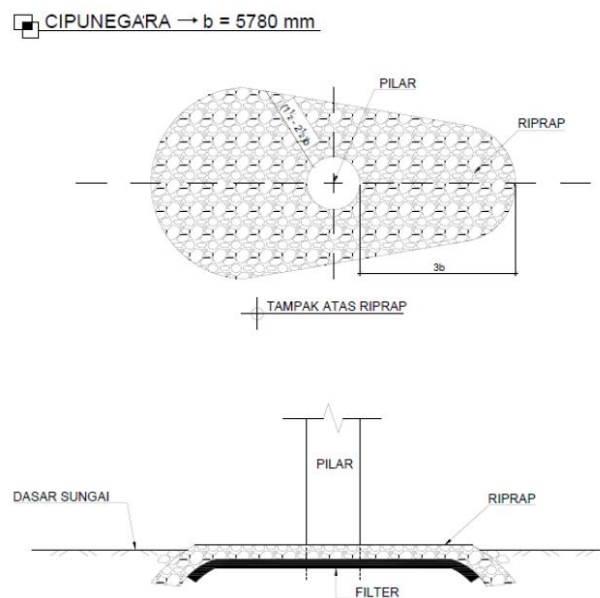
Gambar 7-9 Sketsa Tampak Atas Bentuk *Rip-Rap* (sumber: Setiati, N. R dan Kurniawati, E. 2021)

Berdasarkan gambar 9, untuk kondisi aliran normal lebar *rip-rap* adalah 2 kali lebar pilar.



Gambar 7-10 Sketsa Tampak Samping Bentuk *Rip-Rap* (sumber: Setiati, N. R dan Kurniawati, E. 2021)

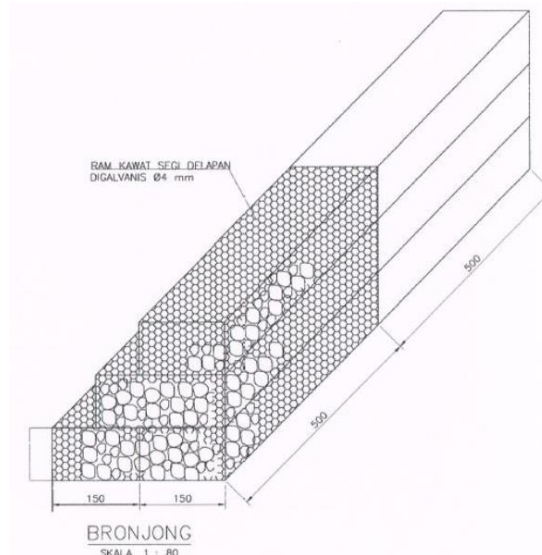
Berdasarkan gambar 10, ketebalan *rip-rap* minimum t adalah $3D_{50}$, kedalaman gerusan kontraksi dan deგრასi jangka panjang, atau kedalaman *bedform*, diambil yang paling besar. Penempatan filter adalah $4/3(b)$ terhadap pilar (semua sekeliling). Hasil analisis desain *rip-rap* untuk Jembatan Cipunegara ditunjukkan dalam gambar 11.



Gambar 7-11 Sketsa Bentuk *Rip-Rap* Jembatan Cipunegara (sumber: Setiati, N. R dan Kurniawati, E. 2021)

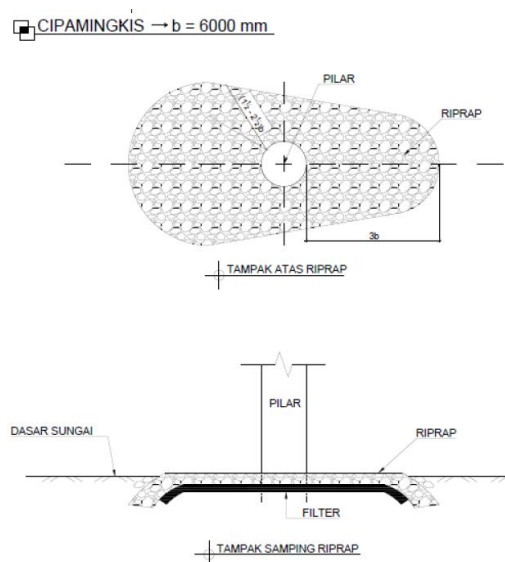
Berdasarkan gambar 11, lebar pilar (b) lebih kecil dari lebar *pilecap* terekspos 5,78 m, yang berlaku untuk desain *rip-rap*, maka jarak *rip-rap extent* adalah antara (8 – 14) m dan 17 m. Ketebalan *rip-rap* minimum adalah 0,456 m. Untuk material dasar D_{50} (0,045 m), maka D_{50} (filter) < 1,8 m sehingga diambil D_{50} (filter) = 1,5 m.

Perkuatan dinding penahan tanah pada Jembatan Cipunegara dibuat dengan menggunakan bronjong sebagaimana ditunjukkan pada gambar 12.



Gambar 7-12 Skema Pemasangan Bronjong pada Dinding Penahan Tanah (sumber: Setiati, N. R dan Kurniawati, E. 2021)

Analisis penanganan gerusan dengan *rip-rap* dilakukan sama pada Jembatan Cipamingkis, hasil desain *rip-rap* pada Jembatan Cipamingkis ditunjukkan pada gambar 13.



Gambar 7-13 Sketsa Bentuk *Rip-Rap* Jembatan Cipamingkis (sumber: Setiati, N. R dan Kurniawati, E. 2021)

Berdasarkan gambar 13, lebar pilar (b) untuk Jembatan Cipamingkis adalah 6 m, maka jarak *rip-rap extent* adalah antara (9 – 15) m dan 18 m. Ketebalan *rip-rap* minimum adalah 1,143 m. Untuk material dasar D_{50} (0,045 m), maka D_{50} (filter) < 1,8 m sehingga diambil D_{50} (filter) = 1,5 m.

Pada penelitian ini maka diambil kesimpulan yaitu

- Jembatan Cipunegara dan Jembatan Cipamingkis terletak di lokasi sungai yang dapat berpotensi adanya gerusan pada jembatan. Untuk mencegah terjadinya keruntuhan akibat gerusan maka perlu dilakukan usaha-usaha pemeriksaan dan evaluasi penanganan gerusan untuk beberapa periode

ulang tertentu. Kedalaman gerusan untuk periode ulang banjir 100 tahun pada pilar Jembatan Cipunegara adalah 7 meter dan untuk Jembatan Cipamingkis adalah 5 meter. Penanganan gerusan untuk Jembatan Cipunegara dan Jembatan Cipamingkis dapat dilakukan dengan menggunakan *rip-rap*.

- Faktor bentuk dan dimensi pilar menjadi parameter utama yang perlu diperhitungkan dalam melakukan analisis gerusan. Keruntuhan jembatan akibat gerusan dapat dihindari dengan melakukan mitigasi penanganan berupa perkuatan disekitar pilar maupun kepala jembatan. Pemasangan *rip-rap* pada pilar Jembatan Cipunegara dan Jembatan Cipamingkis dapat mengurangi terjadinya proses gerusan sebesar 60% sampai dengan periode 100 tahun. Pemeliharaan *rip-rap* jika direncanakan dengan baik akan memerlukan perawatan yang sangat sedikit.

3) Judul Jurnal: Rekayasa Hidraulik untuk Pengendalian Erosi dan Sedimentasi Ruas Sungai Kahayan Berstruktur Membentang Sungai

Salah satu sungai terbesar dan terpanjang di Kalimantan Tengah adalah Sungai Kahayan. Panjang Sungai Kahayan adalah kurang lebih 600 km. Dengan morfologi sungai yang berbelok-belok, penggerusan dapat terjadi di sisi luar belokan sedangkan sedimentasi terjadi di sisi dalam belokan. Salah satu titik belokan yang rawan terhadap penggerusan dan sedimentasi adalah ruas yang dilintasi oleh Jembatan Kahayan. Jembatan ini melintasi Sungai Kahayan di Kota Palangka Raya dan menghubungkan ibu kota provinsi dengan beberapa wilayah kabupaten. Karena ruas sungai ini cukup vital bagi kepentingan umum, maka perlu dilakukan usaha-usaha preventif untuk mencegah dan mengurangi resiko erosi dan sedimentasi di ruas Sungai Kahayan.

Secara umum dikatakan bahwa erosi dan sedimentasi merupakan proses terlepasnya butiran tanah dari induknya di suatu tempat dan terangkutnya material tersebut oleh gerakan angin atau air kemudian diikuti dengan pengendapan material yang terangkut di tempat yang lain. Sebagai wilayah tropis, proses erosi tanah lebih banyak disebabkan oleh air. Erosi tebing sungai, terutama terjadi pada saat banjir, yaitu tebing tersebut mengalami penggerusan air yang dapat menyebabkan longsohnya tebing-tebing pada belokan sungai.



Gambar 7-14 Sungai Kahayan dan Jembatan Kahayan yang Melintasinya (bagian yang dilingkari) (sumber: Nomeritae, et al. 2018)

Analisis hidraulika dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui daya tampung penggal sungai yang diteliti, pola aliran yang terjadi, dan besaran angkutan sedimennya. Analisis hidraulika dilakukan dengan menggunakan *software* HEC-RAS Versi 5.0.3. Pengaruh penambahan bangunan pengatur sungai juga dianalisis dengan metode ini. Berdasarkan hasil simulasi, terlihat terjadi penurunan dasar saluran pada penggal hulu jembatan, sedangkan pada bagian hilirnya terjadi kenaikan. Sedangkan erosi terjadi di dinding/tebing saluran hampir di semua tampang melintang saluran. Sedimen yang masuk pada penggal yang menjadi kajian adalah sebesar 31.793.846 ton sedangkan sedimen yang keluar adalah sebesar 31.809.052 ton. Dengan demikian secara umum terdapat kelebihan sedimen pada penggal sungai sebesar 15.206 ton.

Perencanaan groundsill

Groundsill adalah bangunan yang dibangun melintang sungai yang bertujuan untuk mengurangi kecepatan arus dan meningkatkan laju pengendapan sedimen di bagian hulu *groundsill*. Hal ini dimaksudkan untuk mengamankan pondasi jembatan atau bangunan yang ada di hulu *groundsill*, sehingga struktur bangunan yang berada di bagian hulu sungai seperti jembatan atau bangunan air lainnya aman terhadap erosi. Berdasarkan hasil analisis terlihat bahwa terjadi degradasi dasar sungai di bagian hulu jembatan sedangkan agradasi terjadi di hilirnya. Untuk itu akan direncanakan sebuah *groundsill* yang tidak terlalu tinggi sehingga elevasi mercu *groundsill* direncanakan berada pada beberapa variasi ketinggian yaitu 1, 2 dan 3 m di atas permukaan dasar sungai.

Maka pada penelitian ini diperoleh kesimpulan yaitu

- Untuk mencegah erosi tebing sungai, dapat direncanakan krib dengan panjang 26 m dan jarak antar krib 60 m.

- *Groundsill* dengan tinggi 1 dan 2 m dari dasar sungai efektif mengurangi kecepatan arus sungai sehingga terjadi kenaikan elevasi dasar rata-rata sebesar 0,57 m. *Groundsill* dengan tinggi 3 m dari dasar sungai dapat menaikkan elevasi dasar sungai rata-rata sebesar 0,55 m.
- Jumlah sedimen yang terendap dengan adanya *groundsill* dengan tinggi mercu 11, 12, dan 13 m berturut-turut adalah 58.782 ton; 57.827 ton; dan 55.723 ton.

7.3 Wingwall

Judul Jurnal: *Buried Wing* Dibandingkan dengan *Wing Wall* sebagai Penanggulangan Gerusan *Abutment* dan *Spur Dykes*

Untuk mencegah pembentukan lubang pada dinding vertikal *abutment* di bagian yang menghadap hulu sungai menggunakan *buried wing* sebagai pendekatan baru dengan ekspektasi untuk mengurangi kecepatan aliran dan efek gerusan.

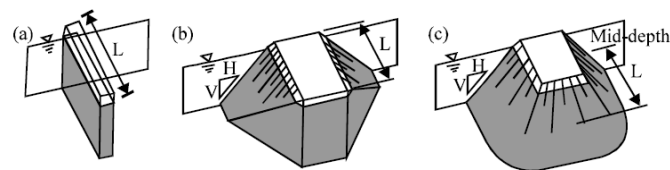
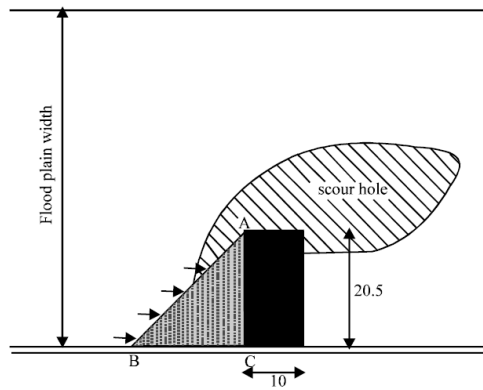


Fig. 1(a-c): Common abutment shapes (Melville and Coleman 2000). (a) Vertical-wall, (b) Wing-wall and (c) Spill-through

Gambar 7-15 Bentuk *Abutment* Umum (A) *Vertical Wall*, (B) *Wing Wall*, dan (C) *Spill Through* (sumber: Saneie. M, et al. 2018)

Abutment dapat ditempatkan pada semua tipe saluran: pada saluran tunggal (tanpa floodplain), pada floodplain, dan pada floodplain dan saluran utama. Oleh karena itu, *buried wing* dapat mencegah perkembangan lubang gerusan terhadap dinding vertikal yang menghadap hulu sungai. *Buried wing* serupa dengan submerged vanes. Johnson et al. (2001) menggunakan vanes pada saluran utama untuk pengendalian gerusan di *vertical wall abutment* pada floodplain. Ghorbani dan Kells (2008) mempelajari efek submerged vanes pada gerusan yang terjadi di pilar silinder.

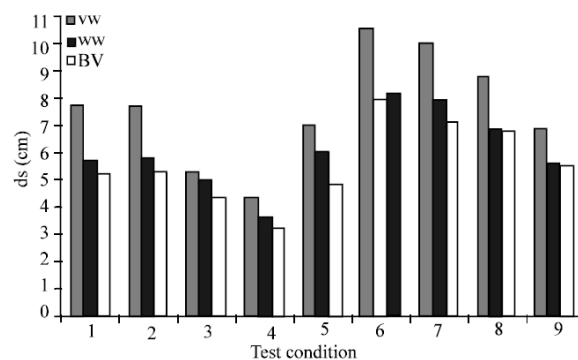
Eksperimen dilakukan dengan menggunakan tiga tipe *abutment* (dinding vertikal, *wing wall* dan *buried wing*) dan sembilan kedalaman aliran air keluar yang berbeda pada kondisi *clear water*.



Gambar 7-16 Skema Diagram *Abutment* jenis *Buried Wing* (sumber: Saneie. M, et al. 2018)

BW digunakan untuk mencegah perkembangan lubang gerusan pada daerah ABC (Gambar 7-15). Dengan menggunakan BW pada *abutment* yang menghadap hulu mencegah pergerakan sedimen ke nose of abutment dan sediment pada bagian ABC dapat ditanggulangi. Dengan demikian lubang gerusan tidak akan berkembang menuju bagian *abutment* yang menghadap hulu. Kemudian, aliran air bawah yang melewati *abutment* dapat berkurang sehingga pergerakan *principal vortex* juga berkurang. Hal ini dapat menyebabkan pengurangan potensi gerusan. Pada BW, aliran air lewat di atas *buried wing* (garis AB) dan memasuki daerah ABC. Ketika aliran air keluar dari daerah ABC karena perbedaan kedalaman lubang gerusan, aliran air akan lewat dari kedalaman maksimum dan tidak akan berdampak pada bertambahnya kedalaman lubang gerusan.

Secara umum kedalaman gerusan memiliki nilai maksimum pada VW dan minimum pada BW (gambar 17).



Gambar 7-17 Kedalaman Gerusan Maksimum (d_s) setelah Eksperimen (sumber: Saneie. M, et al. 2018)

Pada penelitian ini parameter yang digunakan untuk melaporkan jumlah gerusan adalah Appeared Abutment Area (AAA). Dibandingkan dengan VW, penggunaan BW dan WW dapat menurunkan nilai AAA sebesar 70%. Hasil menunjukkan bahwa *buried wing abutment* dibandingkan dengan *vertical wall abutment* mengurangi kedalaman gerusan sebesar 19 - 31,2% dan terhadap *wing wall abutment* sebesar 6 - 26% pada kondisi serupa. Dengan pertimbangan kemudahan dan biaya lebih rendah dalam

penerapannya, *buried wing* memiliki performa lebih baik dibandingkan *wing wall* untuk pengendalian gerusan.

BAB 8 GERUSAN PADA PILAR DAN ABUTMEN JEMBATAN

Jembatan adalah salah satu bangunan yang digunakan untuk kepentingan publik dan umumnya dibangun dengan posisi melintang arah aliran sungai sehingga proses perancangan jembatan harus mempertimbangkan keberadaan aliran sungai. Hal ini dilakukan karena proses kegagalan struktur jembatan seringkali terjadi karena adanya ketidakstabilan dasar sungai sehingga mengakibatkan gerusan lokal di pilar dan abutmen jembatan. Kerusakan maupun runtuhnya jembatan sebagian besar disebabkan oleh adanya kegagalan kestabilan pilar dan abutmen jembatan dalam fungsinya untuk mentransfer beban. Masalah yang ditemui pada jembatan melintang sungai adalah kegagalan struktur bawah jembatan (pondasi, pilar, pangkal/*abutment*) dalam menopang jembatan. Pada beberapa kasus, kegagalan ini berujung pada keruntuhan jembatan. Ancaman terhadap keamanan struktur bawah jembatan sering kali bersumber pada dinamika sungai, khususnya dinamika dasar sungai di sekitar pondasi dan pilar jembatan. Penurunan atau degradasi dasar sungai dan gerusan lokal di sekitar pondasi pilar jembatan sering kali menjadi faktor utama kegagalan struktur bawah jembatan. Banjir besar dapat memperbesar degradasi dasar sungai dan gerusan lokal sehingga dapat pula menambah ancaman terhadap keamanan struktur bawah jembatan.



Gambar 0.1 Dasar Fondasi Jembatan Gantung Mulai Tergerus oleh Aliran Sungai (*sumber: Nenny. 2016*)

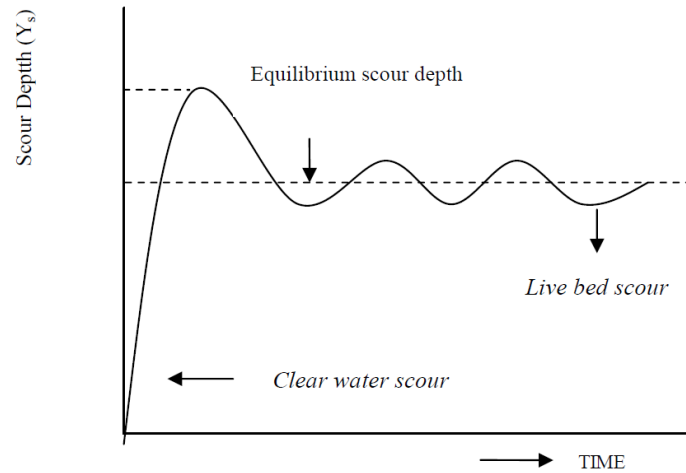
Gerusan merupakan erosi yang terjadi pada lokasi tertentu dengan perbedaan ketinggian lebih besar dibandingkan daerah sekitarnya. Gerusan juga merupakan proses semakin dalamnya dasar sungai karena interaksi antara aliran dengan material dasar sungai. Gerusan terjadi karena aksi erosi air yang mengalir dengan menggali dan membawa material dari dasar dan tebing sungai. Proses penggerusan akan terjadi secara alami, baik karena pengaruh morfologi sungai seperti tikungan sungai atau penyempitan aliran sungai, maupun pengaruh bangunan hidraulika yang menghalangi aliran dan dapat mengubah pola aliran, misalnya keberadaan pilar jembatan, krib sungai, abutment jembatan, dan sebagainya. Bangunan semacam ini dapat mengubah geometri alur serta pola aliran, yang selanjutnya diikuti dengan terjadinya gerusan lokal di dekat bangunan tersebut. Terjadinya percepatan dan *vortex*

di sekitar dasar sungai menghasilkan gaya erosi yang lebih tinggi daripada di sekitar pilar sehingga dapat membawa lebih banyak sedimen dasar dan terbentuklah lubang gerusan.

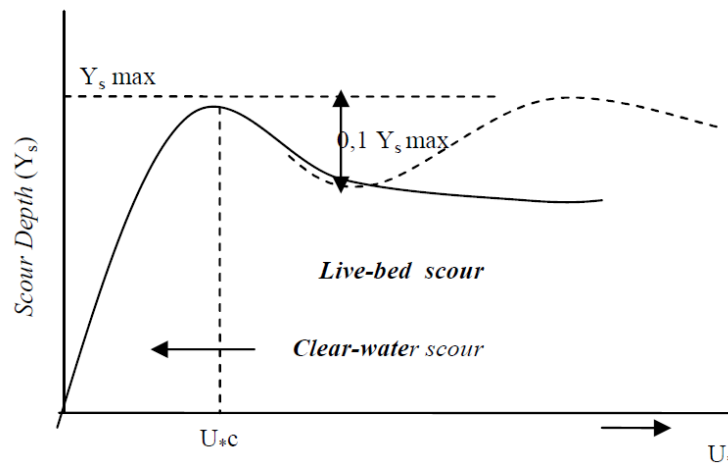
Gerusan yang terjadi pada abutmen maupun pilar jembatan merupakan gerusan total (*total scour*), yaitu kombinasi antara gerusan lokal (*local scour*) dan gerusan umum (*general scour*). Bisa juga kombinasi antara gerusan lokal, gerusan umum dan gerusan terlokalisir atau penyempitan (*localized scour/constriction scour*). Gerusan lokal yang terjadi disekitar abutmen jembatan ataupun pilar disebabkan oleh sistem pusaran air (*vortex system*) karena adanya gangguan pola aliran akibat rintangan, dan gerusan terlokalisir terjadi karena adanya penyempitan penampang sungai oleh adanya penempatan bangunan hidraulika.

Vortex system yang menyebabkan adanya lubang gerusan tersebut dimulai dari sebelah hulu penyempitan (hulu bangunan) yaitu saat mulai munculnya komponen aliran dari arah bawah. Selanjutnya pada bagian bawah komponen tersebut, aliran akan terbalik arah menjadi vertikal yang kemudian diikuti dengan terbawanya material dasar sehingga terbentuk aliran spiral di daerah gerusan. Kondisi aliran yang membentuk pusaran tersebut berdampak terjadinya pengikisan dasar sungai di sekitar bangunan, yaitu dengan terbawa atau terangkutnya material dasar sungai di sekitar bangunan yang akan berakibat timbulnya lubang gerusan. Peristiwa ini berlangsung sampai terjadi keseimbangan yang tergantung pada media yang bergerak, kondisi aliran *clear-water* atau *live-bed*.

Gerusan dapat terjadi dalam dua kondisi, yaitu kondisi tanpa angkutan sedimen (*clearwater scour*) dan kondisi dengan angkutan sedimen (*live-bed scour*). *Clear-water scour* terjadi jika tidak ada gerakan material dasar, atau secara teoretik menunjukkan bahwa tegangan geser dasar (τ_0) lebih kecil atau sama dengan tegangan geser dasar kritik (τ_c). *Live-bed scour* terjadi disertai dengan adanya angkutan sedimen dari material dasar, akibat aliran dalam saluran yang menyebabkan material dasar bergerak. Chabert & Engeldinger (1956) dalam Breuser & Reudkivi (1991) menyatakan bahwa proses gerusan dimulai pada saat partikel yang terbawa bergerak mengikuti pola aliran dari bagian hulu ke bagian hilir saluran. Pada kecepatan tinggi, partikel yang terbawa akan semakin banyak dan lubang gerusan akan semakin besar baik ukuran maupun kedalamannya. Bahkan kedalaman gerusan maksimum akan tercapai pada saat kecepatan aliran mencapai kecepatan kritik. Lubang gerusan (*scour hole*) yang terjadi pada alur sungai adalah hubungan antara kedalaman dengan waktu (Gambar 8.2) dan hubungan antara kedalaman gerusan dengan kecepatan geser (Gambar 8.3).



Gambar 0.2 Hubungan Kedalaman Gerusan dengan Waktu (sumber: Purwantoro, D. 2015)



Gambar 0.3 Hubungan Kedalaman Gerusan dengan Kecepatan Geser (sumber: Purwantoro, D. 2015)

Proses gerusan ini bisa menyebabkan erosi dan degradasi disekitar bukaan jalan air (*water way opening*) suatu jembatan. Degradasi ini berlangsung secara terus menerus hingga akhirnya tercapai keseimbangan antara suplai dan angkutan sedimen yang saling memperbaiki. Apabila suplai sedimen dari hulu berkurang atau jumlah angkutan sedimen lebih besar daripada suplai sedimen, maka bisa menimbulkan kesenjangan yang mencolok antara degradasi dan agradasi di lokasi dasar jalan air jembatan. Kondisi ini menyebabkan lubang gerusan (*scour hole*) pada abutmen maupun pilar jembatan akan lebih dalam bila tidak terdapat atau kurangnya suplai sedimen. Demikian juga apabila tidak terdapat bangunan pengendali gerusan di sekitar abutmen ataupun pilar, maka dalamnya gerusan tidak bisa direduksi, sehingga kedalaman gerusan bisa mencapai maksimum. Hal ini berujung pada rusaknya abutmen maupun pilar jembatan.

8.1 Pilar Jembatan

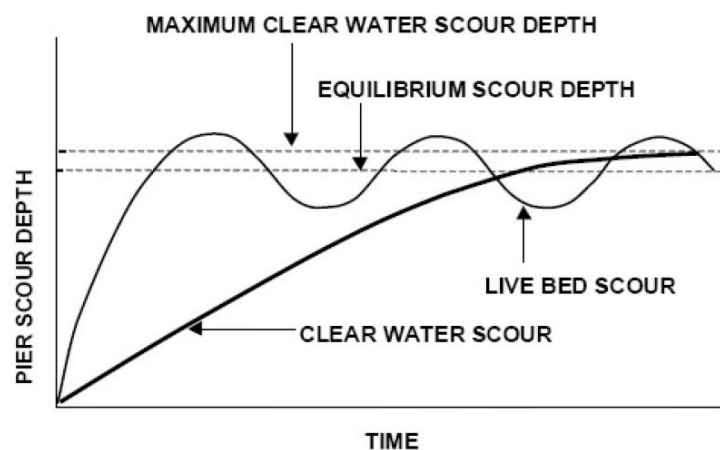
Bentuk pilar jembatan memberikan pengaruh terhadap pola aliran. Aliran yang terjadi pada sungai biasanya disertai proses penggerusan/erosi dan endapan sedimen/deposisi. Proses penggerusan yang terjadi dikarenakan kondisi morfologi sungai dan adanya bangunan sungai yang menghalangi aliran. Pembuatan pilar jembatan akan menyebabkan perubahan pola aliran sungai dan terbentuknya aliran tiga dimensi di sekitar pilar tersebut. Perubahan pola aliran tersebut akan menimbulkan gerusan lokal di sekitar konstruksi pilar.

Keberadaan bangunan air tersebut menyebabkan perubahan karakteristik aliran seperti kecepatan aliran dan turbulensi, sehingga menimbulkan perubahan transpor sedimen dan akhirnya menimbulkan gerusan. Gerakan dari pusaran akan membawa butiran dasar menjauh dari asalnya dan jika debit sedimen yang dihasilkan dari proses gerusan lebih besar dari yang masuk, maka akan terbentuk lubang akibat penggerusan. Pusaran tersebut terjadi di bagian hulu pilar.

A. Mekanisme Gerusan

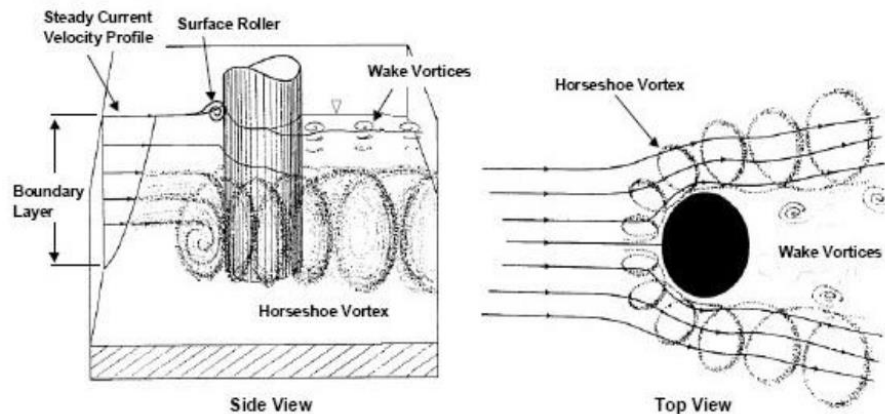
Mekanisme gerusan disekitar pilar jembatan terjadi ketika partikel sedimen yang menutupi pilar mulai berpindah dan proses gerusan mulai terbentuk. Partikel yang tererosi ini akan mengikuti pola aliran dan terbawa dari dekat pilar ke arah dasar sungai. Jika partikel – pertikel sedimen lebih banyak terbawa saat erosi, maka kedalaman gerusan akan mencapai nilai maksimumnya.

Kedalaman gerusan air bersih (*clear water scour*) dan air bersedimen (*live bed scour*) merupakan fungsi kecepatan geser, Chabert dan Engeldinger (1956) dalam Breuser dan Raudkivi (1991:61) menyatakan lubang gerusan yang terjadi pada alur sungai umumnya merupakan korelasi antara kedalaman gerusan dengan kecepatan aliran sehingga lubang gerusan tersebut merupakan fungsi waktu (Gambar 8.4)



Gambar 0.4 Hubungan Kedalaman Gerusan (*clear water* dan *live bed scour*) dengan Waktu (sumber: Nenny. 2016)

Kedalaman gerusan pada pilar, intensitasnya tergantung aliran, sedimen dasar, dan gangguan geometris pilar jembatan. Gerusan disekitar pilar mulai terjadi pada saat material dasar mulai berpindah. Partikel mengalami erosi mengikuti arah aliran dimulai dari bagian hulu ke hilir pilar. Material dasar akan terus tergerus, dan jika kecepatan aliran bertambah maka ukuran dan kedalaman gerusan juga bertambah. Pola gerusan dipilar dapat dilihat pada gambar 8.5.



Gambar 0.5 Mekanisme Gerusan akibat Pola Aliran Air di sekitar Pilar (sumber: Nenny, 2016)

Bentuk yang lebih umum dari intensitas aliran menggunakan kecepatan kedalaman rata-rata/*depth averaged approach velocity* (V) dan kecepatan kritis kedalaman rata-rata/*critical depth averaged approach velocity* (V_c). *Critical depth averaged approach velocity* adalah kecepatan kedalaman rata-rata minimum dari aliran untuk gerakan sedimen yang akan terjadi. Bentuk intensitas aliran (V/V_c) membutuhkan data kecepatan vertikal yang diketahui atau diasumsikan (biasanya logaritmik) untuk menghitung *critical depth averaged velocity* (V_c) dari Gambar 8.4 untuk sedimen yang ada.

B. Kedalaman Gerusan

Beberapa faktor yang mempengaruhi kedalaman gerusan yang terjadi disekitar jembatan antara lain kecepatan aliran pada alur sungai; gradasi sedimen; ukuran pilar dan ukuran butir material dasar; kedalaman dasar sungai dari muka air; dan bentuk pilar serta posisi pilar.

1. Kecepatan Aliran pada Alur Sungai

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

2. Gradasi Sedimen

Gradasi sedimen dari sedimen transpor merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kedalaman gerusan pada kondisi air bersih (*clear water scour*). Estimasi kedalaman gerusan yang disebabkan adanya pengaruh distribusi material dasar mempunyai nilai maksimum dalam kondisi setimbang pada aliran air bersih (*clear water*) yaitu:

$$\frac{Y_s(\sigma)}{b} = K_\sigma \cdot Y_s/b$$

dengan:

Y_s : kedalaman gerusan (m)

σ : simpangan baku

b: lebar pilar jembatan (m)

K_σ : koefisien simpangan baku

3. Ukuran Pilar

Berdasarkan data yang diperoleh Laursen dan Toch (1956); Breuser dan Raudviki (1971) dalam Okky (2007) menemukan persamaan pilar bulat jembatan, yaitu:

$$y_{me} = 1,35k_i b^{0,7} b^{0,3}$$

dengan:

b: lebar pilar jembatan (m)

h_0 : kedalaman aliran (m)

k_i : faktor koreksi (untuk pilar buat $k_i = 1,0$)

y_{me} : kedalaman gerusan saat seimbang (m)

Volume lubang gerusan dibentuk untuk mengelilingi pilar dan sebanding dengan diameter kubik dari pilar itu sendiri. Hal ini berarti semakin lebar pilar maka semakin banyak gerusan sekaligus semakin banyak pula waktu yang diperlukan untuk melakukan penggerusan.

4. Kedalaman Dasar Sungai dari Muka Air

Dalam gerusan lokal yang terjadi dipengaruhi oleh kedalaman dasar sungai dari muka air (tinggi aliran zat air), maka kecepatan relatif ($U*/U_*c$) dan kedalaman relatif (y_0/b) merupakan faktor penting untuk mengestimasi kedalaman gerusan lokal ini. Neil (1964) dalam Breuser (1991:70) menyatakan kedalaman gerusan lokal merupakan fungsi dari tinggi aliran dengan persamaan sebagai berikut:




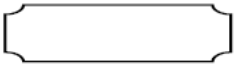


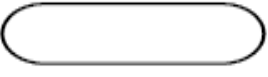
$$y_s/y_0 = 1,5 \left(\frac{b}{y_0} \right)^{0,70}$$

Keseimbangan gerusan lokal pada aliran rendah akan tercapai jika telah terjadi kesamaan nilai (U^*/U^*c) dan y_0/b . Pengaruh dari y_0/b tidak dapat dibedakan antara kondisi *clear water scour* dan *live bed scour*. Pada (U^*/U^*c) yang konstan, faktor pengaruh dari kedalaman aliran dapat diabaikan untuk $y_0/b \geq 2$.

5. Bentuk Pilar

Bentuk pilar akan berpengaruh pada kedalaman gerusan lokal. Pilar jembatan yang tidak bulat akan memberikan sudut yang lebih tajam terhadap aliran datang. Pilar yang bulat diharapkan dapat mengurangi gaya pusaran tapal kuda sehingga dapat mengurangi besarnya kedalaman gerusan. Hal ini juga tergantung pada panjang dan lebar (l/b) pilar. Masing-masing bentuk pilar mempunyai koefisien faktor bentuk (K_s), menurut Dietz (1971) dalam Breuser dan Raudkivi (1991:73) yang tujukan dalam tabel berikut:

Tabel 0.1 Koefisien Faktor Bentuk Pilar (sumber: Nenny. 2016)

Bentuk Pilar	b/l	b'/l'	K _s	Bentuk Pilar
Silinder			1	
Persegi	1:1		1,22	
	1:5		0,99	
Persegi dengan ujung setengah lingkaran	1:3		0,9	
Ujung setengah lingkaran dengan bentuk belakang lancip	1:5		0,86	
Persegi dengan sisi depan miring	1:3	1:2	0,76	
Ellips	1:2		0,83	
	1:3		0,8	
	1:5		0,61	
Lenticular	1:2		0,8	
	1:3		0,7	
Aerosol	1:3,5		0,8	

6. Posisi Pilar (Sudut Kemiringan Pilar)

Kedalaman gerusan lokal juga tergantung pada kedudukan/posisi pilar terhadap arah aliran yang terjadi maupun panjang dan lebarnya pilar. Kedalaman gerusan merupakan rasio dari panjang dan lebar serta

sudut dari tinjauan terhadap arah aliran. Koefisien sudut datang aliran karena posisi pilar digunakan pada beberapa bentuk tertentu. Hanya bentuk silinder yang tidak menggunakan koefisien sudut datang. Koefisien sudut datang arah aliran seperti Gambar 8.6. Laursen dan Touch (1956) mempelajari hal ini pada pilar *rectangular horizontal croos section* dengan memberikan sudut kemiringan terhadap aliran. Bila sudut terjang aliran terhadap pilar adalah 00 maka $K_\alpha = 1$. Nagasaki dan Suzuki (1976) menyajikan beberapa pengujian gerusan disekitar pilar *rectingular horizontal croos section* dengan L_b/b berkisar 1,75 dengan variasi sudut 00 – 450. Dari penelitian tersebut gerusan yang terjadi untuk sudut 300 hampir sama dengan 450, namun itu lebih besar dari 00 dengan $K_\alpha = 1,3 - 1,8$.

$$K_\alpha = \left(\cos \alpha + \frac{b}{b \sin \alpha} \right)^{0,62}$$

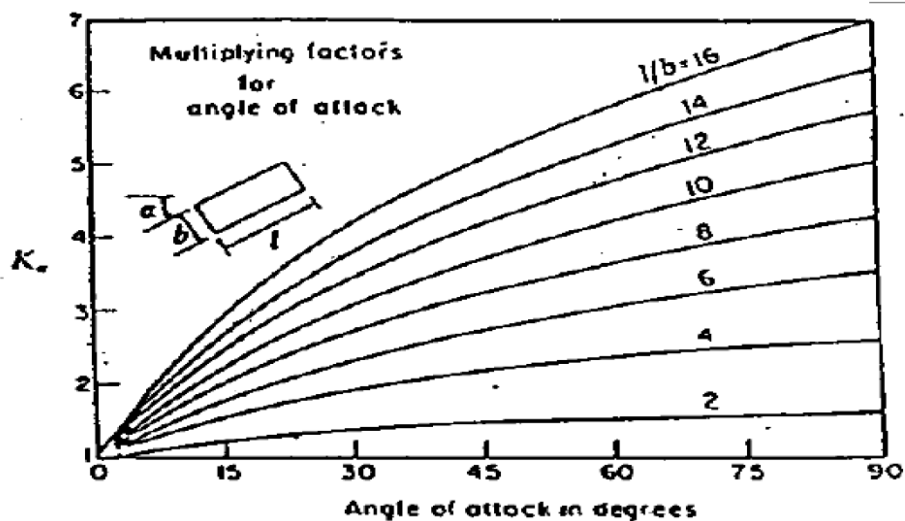
dengan:

K_α : faktor orientasi pilar terhadap aliran

b: sisi lebar bentuk pilar (m)

L_b : sisi panjang bentuk pilar (m)

α : sudut datang aliran terhadap pilar



Gambar 0.6 Koefisien Arah Sudut Aliran (K_α) ada Pilar (sumber: Nenny. 2016)

C. Persamaan Gerusan

1. Persamaan Laursen

Kedalaman gerusan untuk *clear-water scour* dengan $\tau_o < \tau_{cr}$ pada pilar adalah

$$\frac{L_A}{y_o} = 2,75 \left(\frac{y_s}{y_o} \right) \left[\frac{\left(\frac{y_s}{11,5y_o} + 1 \right)^{2/6}}{\tau_o / \tau_{cr}} - 1 \right]$$

2. Persamaan Froehlich

Froehlich menggunakan analisa dimensi dan analisa multipel regresi terhadap 164 percobaan *clear water scour* pada sebuah *flume* di laboratorium dan diperoleh persamaan berikut

$$\frac{d_s}{d_o} = 0,78K_1K_2 \left(\frac{L_A}{h} \right)^{0,63} Fr^{1,16} \left(\frac{y_o}{d_{50}} \right)^{0,43} \sigma^{-1,87}$$

dengan:

d_o : kedalaman aliran (m)

d_s : kedalaman gerusan (m)

K_1 : koefisien bentuk pilar

K_2 : koefisien sudut pilar terhadap aliran

L_A : diameter pilar (m)

Fr: bilangan Froude dari aliran

$\sigma = \left(\frac{d_{84}}{d_{16}} \right)^{0,5}$: standar deviasi geometri material dasar

3. Persamaan Garde dan Raju

Persamaan Garde dan Raju digunakan pada gerusan lokal di sekitar pilar jembatan, spur dan abutmen jembatan untuk aliran *clear-water scour* dan *lived-bed scour*. Kedalaman gerusan tak berdimensi, D/D_o dinyatakan sebagai berikut

$$\frac{d}{y_o} = \frac{4,0}{\alpha} \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \left(\frac{U}{\sqrt{g \cdot y_o}} \right)^{n^*}$$

dengan:

α : perbandingan bukaan (B-L)/B

d_s : kedalaman gerusan maksimum diukur dari muka air ($h + d_s$), m

h: kedalaman aliran, m

U: kecepatan rata-rata aliran, m/dt

α : perbandingan bukaan (B-L)/B

n^* : eksponen, fungsi ukuran sedimen, dan geometri halangan

$\eta_1\eta_2\eta_3\eta_4$: koefisien

4. Pendekatan *The Colorado State University* (CSU)

Gerusan di pilar menyebabkan terjadinya *horseshoe vortex* yang disebabkan oleh aliran di dasar pilar. Persamaan *The Colorado State University* (CSU) digunakan untuk menghitung kedalaman gerusan disekitar pilar menggunakan persamaan berikut

$$\frac{\Delta z}{h} = 2K_1K_2\left(\frac{a}{h}\right)^{0,65} Fr^{0,43}$$

dengan:

Δz : kedalaman gerusan (m)

h : kedalaman aliran (m)

K_1 : koefisien bentuk pilar

K_2 : koefisien sudut pilar terhadap aliran

a : lebar pilar (m)

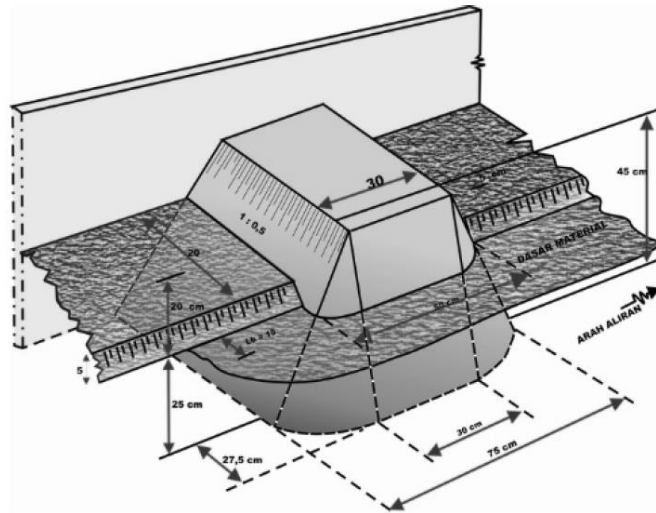
Fr : angka Froude

8.2 Abutmen

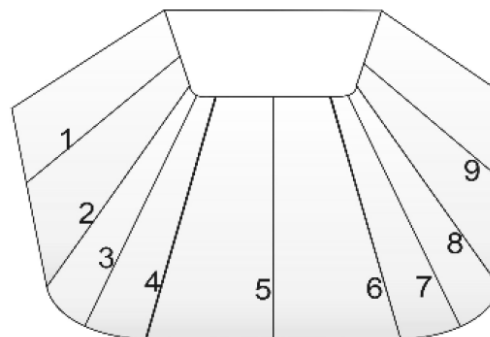
Abutmen adalah salah satu bagian konstruksi jembatan yang terletak pada tepi sungai dan merupakan pangkal jembatan yang berfungsi sebagai tumpuan beban. Tipe geometri abutmen bermacam-macam, diantaranya *wing-wall abutment* (WW), *spillthrough abutment* (ST), *semi-circular abutment* (SCE) dan *triangular-shaped abutment*. Rinaldi (2002) meneliti tentang proteksi gerusan pada abutmen tipe *semicircular end* (SCE) dengan kondisi *clear-water scour*. Proteksi gerusan menggunakan pelat; posisi pelat yang optimal adalah pelat yang berada di dasar saluran dan kemiringan 120° terhadap vertikal; posisi tersebut mampu mereduksi kedalaman gerusan sebesar 24,75%.

Jaji (2004) melakukan penelitian tentang pengendalian gerusan pada model abutmen tipe *spill-through* dengan menggunakan pelat, tirai dan *groundsill* sebagai pelindung pada kondisi *live-bed scour* untuk saluran prismatis berbentuk segi empat. Hasil penelitian menunjukkan proteksi dengan tirai pada jarak $4 L_b$ untuk saluran prismatis mampu mereduksi sebesar 49,71%. Melville (1995) meneliti tentang kedalaman gerusan di sekitar abutment jembatan pada saluran majemuk (*compound channel*) dengan menggunakan tipe *wing-wall abutment*. Penelitian dilakukan dengan membandingkan antara saluran

persegi (*rectangular channel*) dengan saluran majemuk. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedalaman gerusan pada saluran majemuk lebih kecil bila dibandingkan pada saluran persegi.



Gambar 0.7 Model Abutmen Tipe *Spillthrough* (sumber: Abdurrosyid, J dan Fatchan, A.C. 2007)

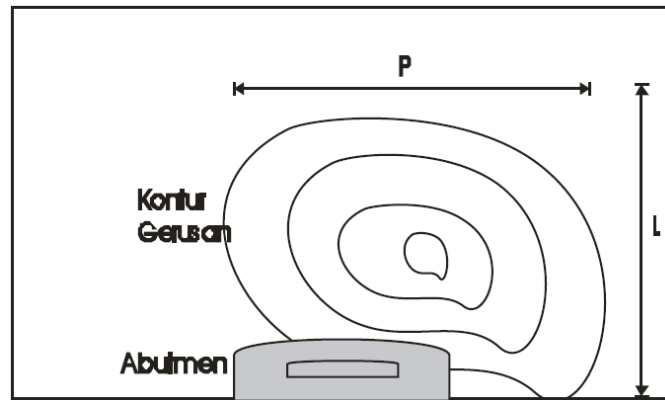


Gb. Posisi Titik Pengamatan Kedalaman Gerusan pada Abutmen

Gambar 0.8 Posisi Titik-Titik Pengamatan pada Tipe *Spillthrough* (sumber: Abdurrosyid, J dan Fatchan, A.C. 2007)

- Gerusan pada Tipe *Spillthrough* dengan *Live Bed Scour* tanpa Proteksi

Kedalaman gerusan pada kondisi *live-bed scour* sangat dipengaruhi oleh kecepatan aliran, kekentalan aliran, lebar dasar abutmen, gravitasi aliran dan kedalaman aliran. Mengenai kajian lubang gerusan (*scour-hole*), gerusan terjadi dimulai pada ujung abutmen sebelah hulu, kemudian berkembang sepanjang sisi abutmen sampai bagian hilir. Gerusan terus berlangsung hingga membentuk lubang gerusan (*scoure hole*) yang dalamnya cenderung mengalami pendangkalan ke bagian hilir. Sedangkan di bagian hilir lubang gerusan terutama dibagian pinggir, terjadi pengendapan sedimen (*deposition*) sementara, pengendapan ini berkembang terus hingga akhirnya tererosi kembali kebagian lebih hilir, akhirnya terkumpul serta endapan bertambah di bagian hilir lubang gerusan dan semakin panjang seiring dengan bertambahnya waktu. Lubang gerusan tersebut membentuk setengah sepatu tapal kuda seperti yang terlihat pada Gambar 8.9.



Gambar 0.9 Sketsa Lubang Gerusan (sumber: Abdurrosyid, J dan Fatchan, A.C. 2007)

Berdasarkan data tersebut dapat diperoleh persamaan hubungan antara kecepatan relatif aliran (U/U_*) terhadap lebar relatif lubang gerusan (L/d_s) pada kontur kedalaman gerusan di sekitar abutmen jembatan yang dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut

$$\frac{U}{U_*} = 21.315 - 4.145 \log \left(\frac{L}{d_s} \right)$$

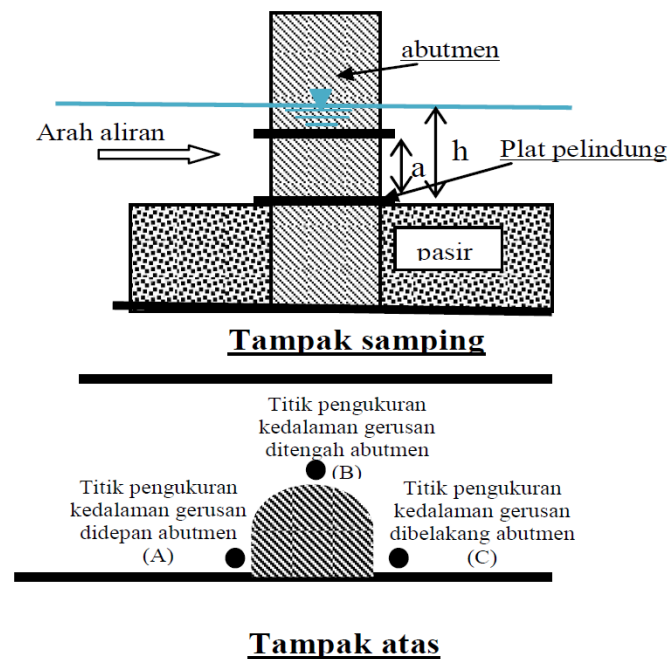
Demikian juga hubungan antara kecepatan relatif aliran (U/U_*) terhadap panjang relatif lubang gerusan (P/d_s) pada kontur kedalaman gerusan di sekitar abutmen jembatan dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut.

$$\frac{U}{U_*} = 24.369 - 5.88 \log \left(\frac{P}{d_s} \right)$$

Berdasarkan kedua persamaan di atas, terlihat bahwa terdapat hubungan yang erat antara kecepatan aliran dengan besarnya lebar maupun panjang lubang gerusan disekitar abutmen jembatan pada kondisi *live-bed scour*.

Berbagai penelitian telah dilaksanakan berkaitan dengan pengendalian gerusan yang terjadi di sekitar bangunan di sungai baik disekitar pilar maupun abutmen jembatan. Studi tentang gerusan di sekitar dua abutmen jembatan dilaksanakan oleh Rawiyah dan B. Yulistiyanto (2007), bahwa penggunaan plat pelindung paling efektif mengurangi gerusan pada jarak antara abutmen (a) dibagi lebar abutmen (D_p), $a/D_p = 3$ yakni 36,7% untuk gerusan depan, 54,6% untuk gerusan tengah dan 53,2 % untuk gerusan belakang terhadap gerusan pada abutmen ganda tanpa plat. Beberapa metode lain yang diusulkan oleh Graf (1998) diantaranya adalah dengan membuat pondasi blok pada dasar pilar yang ditempatkan di bawah dasar saluran yang efektif untuk meniadakan aliran vertikal ke bawah. Selain itu dengan

menempatkan *ring-formed* pada pilar dapat mengurangi gerusan. Metode lain yaitu dengan menyusun pilar-pilar kecil di hulu dari pilar yang dapat melemahkan sistem pusaran telapak kuda.



Gambar 0.10 Model Variasi Penempatan Plat Pelindung Abutmen dalam Saluran (sumber: Lutjito dan AD, Sudiyono, 2016)

Lutjito dan Sudiyono, AD (2016) merangkum data hasil pengamatan kedalaman gerusan terhadap waktu yang memperlihatkan perbedaan antara jarak penempatan plat sayap pelindung dan tanpa plat sayap pelindung pada debit yang sama. Pada pengamatan terlihat bahwa penambahan kedalaman gerusan berhubungan langsung cepat pada menit-menit awal. Selanjutnya peningkatan kedalaman gerusan akan semakin mengecil sampai tercapainya kondisi seimbang. Bentuk abutmen dengan plat sayap pelindung akan mengakibatkan pengurangan kedalaman gerusan di sekitar abutmen, ini disebabkan karena arus dari arah hulu abutmen yang mengarah kebawah terhalang oleh adanya plat sayap pelindung. Pada titik pengamatan A di bagian hulu abutmen penggunaan plat sayap pelindung memberikan perlindungan yang maksimum hanya pada penggunaan dua plat dengan jarak $0,25h$ yang hanya memberikan pengurangan kedalaman gerusan sebesar 63,3%. Pada pengamatan di titik B penggunaan plat pelindung memberikan efisiensi kedalaman gerusan sebesar 35% sedangkan pada titik C di hilir abutmen memberikan tingkat efisiensi sebesar 50%. Penggunaan dua plat pelindung pada abutmen dengan jarak antara plat $0,75h$ lebih baik dalam mengurangi kedalaman gerusan secara keseluruhan dibanding plat dengan jarak $0,25h$ dan $0,50h$. Sedangkan, penggunaan plat sayap pelindung sangat efektif karena dapat mengurangi gerusan di hulu abutmen sebesar 100%.

Daftar Pustaka:

- A Kirby and K Guganesharajah, Mott MacDonald Ltd. 2004. *Afflux at Bridges and Culverts*. UK: R&D Project Record W5A-061/PR4.
- Abdurrosyid, J dan Fatchan, A.C. 2007. Gerusan di Sekitar Abutmen dan Pengendaliannya pada Kondisi Ada Angkutan Sedimen untuk Saluran Berbentuk Majemuk. *Dinamika TEKNIK SIPIL*, Volume 7, Nomor 1, Januari 2007:20 – 29.
- Chen, Y. H and Anderson, B. A. 1987. Methodology for Estimating Embankment Damage Caused by Flood Overtopping. *TRANSPORTATION RESEARCH RECORD 1151*. FHWA, U.S. Department of Transportation and U.S. Department of Agriculture Forest Service
- DHI. 2009. *MIKE 11: A Modelling System for Rivers and Channels, Reference Manual*.
- Fatimah, Siti. 2009. Pengaruh Sungai pada Kerusakan Jalan dan Jembatan. *Konferensi Nasional Teknik Sipil 3*, Jakarta, 6 – 7 Mei 2009. Universitas Pelita Harapan – Universitas Atma Jaya Yogyakarta.
- Frida Amanda. 2017. Laporan Tugas Akhir: Perubahan Kedalaman Muka Air pada Saluran Terbuka akibat Penyempitan dengan Variasi Kemiringan Saluran dan Bukaannya Pintu Radial. Jember: Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jember
- G. Seckin et al. 2009. Application of ANN techniques for estimating backwater through bridge constrictions in Mississippi River basin. *Advances in Engineering Software* 40 (2009) 1039–1046.
- Harianja, J.A dan Gunawan, S. Tinjauan Energi Spesifik akibat Penyempitan pada Saluran Terbuka. *Majalah Ilmiah UKRIM Edisi 1/th XII/2007*
- Hunt, J. H dan Brunner, G. W. 1995. *Flow Transitions in Bridge Backwater Analysis*. RD-42: US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center.
- K. M. Arsyad. 2017. Modul 5 Hidrologi dan Hidrolika Sungai: Pelatihan Pengendalian Banjir. Bandung: Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi.
- K. M. Arsyad. 2017. Modul Hidrolika Sungai: Pelatihan Perencanaan Teknik Sungai. Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi. Bandung: KemenPUPR
- Kevin, et al. 2019. Optimalisasi Jarak antar *Pile Cap* di *Trestle* dengan Studi Kasus pada Pelabuhan Bontang. *Jurnal Mitra Teknik Sipil* Vol. 2, No. 2, Mei 2019: hlm 25-34
- Les Hamill. 1999. *Bridge Hydraulics*. London: E & FN Spon.
- Lestari, S. 2015. Pencegahan Gerusan Tebing pada Jembatan di Sungai Luk Ulo, Kebumen – Jawa Tengah. *Jurnal Teknik Hidraulik* Vol. 6, No. 2 Desember 2015; 163 – 176.

- Lutjito dan AD, Sudiyono. 2016. Upaya Pengendalian Gerusan di Sekitar Abutmen Jembatan. *INERSIA*, Vol. XII No.1, Mei 2016, Hal. 70 – 77.
- Masiku, Henrianto. 2019. Perencanaan Sub Struktur Jembatan Sungai Orongan Kabupaten Toraja Utara. *Dynamic SainT Jilid IV, No. 1, April 2019*. Jurusan Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia Toraja.
- Maulana, M. A, et al. 2019. Preliminary Recognition of River Infrastructure *Journal of Infrastructure & Facility Asset Management – Vol. 1, Issue 1, March 2019*
- Moerwanto, A.S dan Zulfan, J. Mitigasi Bencana Alam pada Infrastruktur Jalan dan Jembatan. *Jurnal HPJI Vol. 6 No. 1 Januari 2020: 1–14*
- Nenny. 2016. Disertasi S3 Teknik Sipil: Model Proteksi Gerusan pada Pilar dengan Tirai Bersisi Cekung. Makassar: Sekolah Pascasarjana Universitas Hasanuddin.
- Nomeritae, et al. 2018. Rekayasa Hidraulik untuk Pengendalian Erosi dan Sedimentasi Ruas Sungai Kahayan Berstruktur Membentang Sungai. *Jurnal Teknik*, Vol. 2, No. 1, Oktober 2018, hlm 57- 67.
- Purnomo, S. N, et al. 2016. Efektivitas Bentuk Abutmen terhadap Gerusan di Sekitar Abutmen Jembatan. *Jurnal Teknik Sipil, VoL. 13, No. 4, April 2016, hlm 323-331*.
- Purwanto, D. 2015. Model Pengendalian Gerusan di Sekitar Abutmen dengan Pemasangan Groundsill dan Abutmen Bersayap. *INERSIA*, Vol. XI No.1, Mei 2015, Hal. 79 – 89.
- Rustiati, N. B. 2007. Gerusan Lokal disekitar Abutment Jembatan Labuan. *Jurnal SMARTek*, Vol. 5, No. 3, Agustus 2007: 157 – 165.
- Sanie. M, et al. 2012. Buried Wing Versus Wing Wall as Abutments and Spur Dykes Scour Countermeasure. *Asian Journal of Applied Sciences*, 5 (4): 192-204, 2012.
- Sarwono. 2016. Studi Karakteristik Gerusan Lokal Pada Beberapa Tipe Pilar Jembatan. *Jurnal Sumber Daya Air*, Vol.12 No. 1, Mei 2016: 89 – 104.
- Setiati, N. R dan Kurniawati, E. 2021. Analisis Perkuatan Bangunan Bawah Jembatan dengan *Rip-Rap*. *Jurnal Jalan-Jembatan*, Volume 38 No. 1 Januari-Juni 2021: 21-33.
- Setiati, N. R, et. al. 2019. Analisis Penanganan Dampak Bahaya Gerusan Aliran Sungai pada Struktur Pilar Jembatan. *Jurnal Jalan-Jembatan*, Volume 36 No. 1 Januari-Juni 2019: 41-53.
- Setiyadi. 2014. Laporan Penelitian Tinjauan Kecepatan Aliran pada Tikungan Saluran Terbuka. Jakarta: Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia.

Simons, Li & Associates, Inc. 1988. Minimizing Embankment Damage during Overtopping Flow. FHWA, U.S. Department of Transportation and U.S. Department of the Interior Bureau: Reclamation Engineering and Research Center

[http://196.189.45.87>culvert and bridge material.pdf](http://196.189.45.87>culvert%20and%20bridge%20material.pdf), diakses pada 5 Mei 2022

[https://doi.org/10.1016/S0167-5648\(08\)70443-X](https://doi.org/10.1016/S0167-5648(08)70443-X), tanggal akses 24 April 2022

<https://osf.io/download-rangkuman-bangunan-silangan-dengan-sungai>, tanggal akses 22 Mei 2022

<https://redac.eng.usm.my>cross-drainageHydraulic-Structures-Novak>, tanggal akses 28 Mei 2022

<https://www.academia.edu/aliran-balik-backwater-putri-mumtahana>, tanggal akses 22 Mei 2022

<www.emodul.untad.ac.id>reksun-mod5.pdf>, diakses pada 2 Mei 2022