

BAB II

LANDASAN TEORI

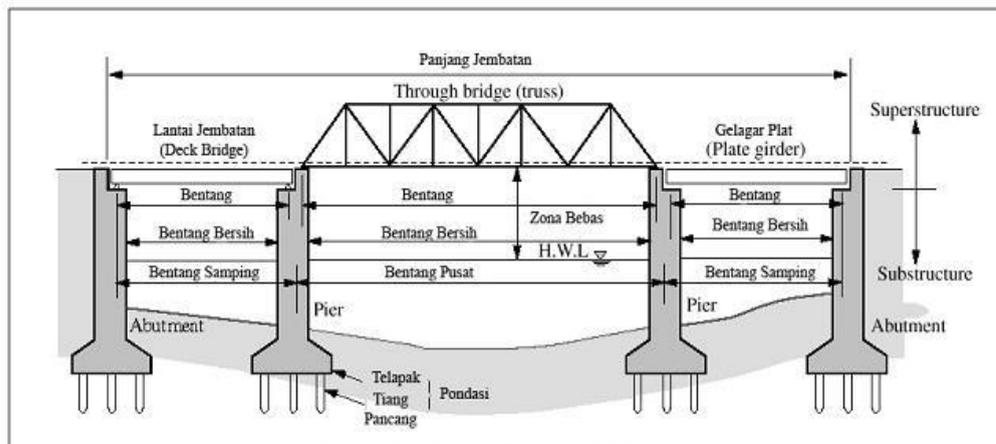
2.1. Pengertian sungai, gerusan dan pilar jembatan

Sungai memiliki banyak sekali manfaat bagi kehidupan makhluk hidup dan memiliki peranan yang sangat penting bagi manusia, hal tersebut dapat dibuktikan dengan pemanfaatan sungai yang makin lama semakin meluas, mulai dari sarana transportasi, sumber air baku, sumber tenaga listrik, wahana rekreasi dan masih banyak lagi.

Menurut Triatmodjo (2008) sungai atau saluran terbuka adalah saluran dimana air mengalir dengan muka air bebas. Pada saluran terbuka, misalnya sungai (saluran alam), variabel aliran sangat tidak teratur terhadap ruang dan waktu. Variabel tersebut adalah tampang lintang saluran, kekasaran, kemiringan dasar, belokan, debit aliran dan sebagainya.

Gerusan adalah perubahan dari suatu aliran yang disertai pemindahan material melalui aksi gerakan fluida. Gerusan lokal (*Local Scouring*) terjadi pada suatu kecepatan aliran dimana sedimen diangkut lebih besar daripada sedimen disuplai ($Q_{s,in} < Q_{s,out}$). Angkutan sedimen bertambah dengan meningkatnya tegangan geser (tegangan yang bekerja sejajar atau menyinggung permukaan) sedimen, gerusan terjadi ketika perubahan kondisi aliran menyebabkan peningkatan tegangan geser pada dasar saluran. Dapat dikatakan bahwa gerusan adalah erosi pada dasar dan tebing saluran alluvial. (Hoffmans dan Verheij,1997).

Proses gerusan pada sungai umumnya terjadi karena perubahan pola aliran, terutama pada sungai alluvial. Perubahan tersebut terjadi karena adanya rintangan pada aliran sungai, berupa rintangan bangunan sungai seperti abutmen jembatan, pilar jembatan, krib sungai, spur-dikes, dan sebagainya. Bangunan semacam ini dipandang dapat merubah geometri alur serta pola aliran yang selanjutnya diikuti dengan terjadinya gerusan lokal di dekat bangunan. (Legono,1990). Pada Gambar 2.1. merupakan struktur jembatan yang biasanya ada di atas sungai:



Gambar 2.1. Tipikal Jembatan
(Sumber: Chen & Duan, 2000)

Seperti yang ditampilkan gambar jembatan pada Gambar 2.1. di atas bahwa jembatan dibagi menjadi 2 bagian penting yaitu *super-structure* (struktur bagian atas) yang terdiri dari lantai jembatan, gelagar plat, dan jembatan itu sendiri yang berupa *truss*. Bagian bawah jembatan dinamakan *Sub-structure* yaitu terdiri dari *abutment*, pilar/*pier*, dan pondasi. Perbedaan *abutment* dan pilar adalah, *abutment* atau kepala jembatan adalah konstruksi jembatan yang berfungsi sebagai dinding tumpuan atau penahan tanah dan merupakan pangkal jembatan yang berada pada ujung-ujung jembatan.

pilar adalah struktur yang berada diantara *abutment* yang berfungsi sebagai struktur pendukung di bawah jembatan. Biasanya pilar ada pada jembatan yang bentangnya panjang. Dengan adanya pilar jembatan ini menyebabkan perubahan aliran berupa penyempitan aliran, atau adanya belokan karena terhalang oleh pilar jembatan, sehingga lama-kelamaan akan menyebabkan terjadinya perubahan pada sungai, diantaranya kedalaman dasar sungai.

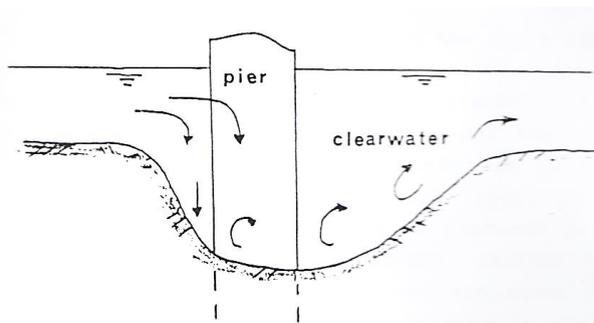
Dengan terjadinya perubahan tersebut mengakibatkan posisi dari jembatan terutama posisi pilar juga ikut berubah dan akan menyebabkan ketidakstabilan struktur yang akan mengakibatkan keruntuhan pada struktur jembatan. Karena itu perlu adanya suatu perencanaan dan pemantauan yang berhubungan dengan pilar jembatan agar struktur lebih tahan lama dan keamanannya bertambah. Menurut Breusers dan Raudkivi (1991) gerusan yang terjadi akibat faktor aliran dibagi menjadi 2 kategori yaitu:

1. *Clear – water Scour*

Gerusan yang terjadi jika material yang ada pada bagian hulu gerusan dalam keadaan diam atau tidak terangkut. Tegangan geser dasar sungai yang terjadi disebelah hulu bangunan lebih kecil dibandingkan dengan tegangan geser kritik awal pergerakan partikel ($\tau_0 < \tau_c$).

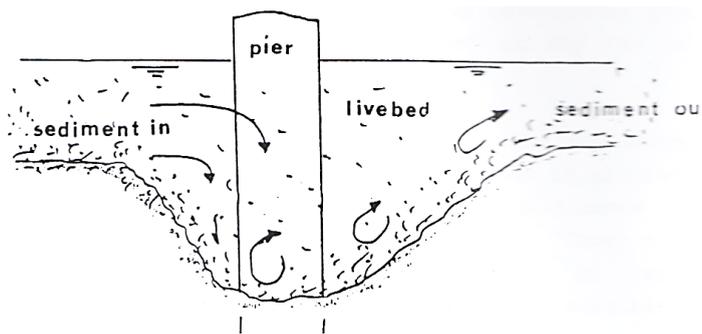
2. *Live – bed Scour*

Gerusan yang terjadi dengan disertai transport sedimen. Hal ini terjadi ketika tegangan geser pada dasar sungai sudah lebih besar daripada nilai kritiknya ($\tau_0 > \tau_c$). Keseimbangan kedalaman gerusan tercapai ketika jumlah material yang telah bergerak dari lubang gerusan sama dengan material yang tersuplai ke lubang gerusan.



Gambar 2.2. Gerusan Lokal Dengan Kondisi *Clear Water*

(Sumber: Buku *Bridge Scour* University Of Strathclyde oleh Dr John Ridell dan Jim Graham)

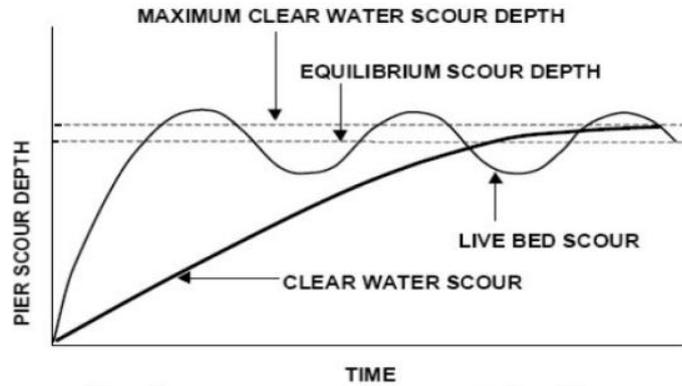


Gambar 2.3. Gerusan Lokal Dengan Kondisi *Live Bed Scour*

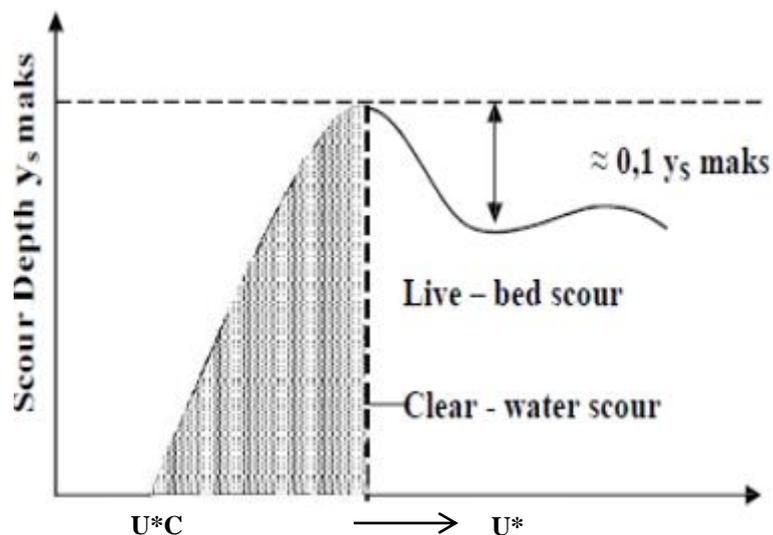
(Sumber: Buku *Bridge Scour* University Of Strathclyde oleh Dr John Ridell dan Jim Graham)

Di bawah ini ditampilkan Gambar 2.4. dan Gambar 2.5. yang merupakan grafik hubungan kedalaman gerusan (Y_s) dengan waktu (t) dan hubungan kedalaman

gerusan (Y_s) dengan kecepatan geser (v^*) yang didapat dari hasil penelitian Chabert dan Engeldinger (1956):



Gambar 2.4. Hubungan Kedalaman Gerusan (Y_s) Dengan Waktu (T)
(Sumber: Breusers dan Raudkivi, 1991 dalam Okky martono pengaruh arah aliran terhadap gerusan lokal)



Gambar 2.5. Hubungan Kedalaman Gerusan (Y_s) Dengan Kecepatan Geser (V^*)
(Sumber: Breusers dan Raudkivi, 1991 dalam Okky martono pengaruh arah aliran terhadap gerusan lokal)

Gambar 2.4. menjelaskan bahwa semakin lama waktu yang berjalan semakin dalam gerusannya. Pada *clear water scour* kedalaman gerusan berangsur-angsur mengalami peningkatan sampai dengan titik maksimum dimana kapasitas angkut sedimen berkurang menjadi nol. Berbeda dengan *live bed scour* dimana dia membawa angkutan sedimen. Pada *live bed scour*, kedalaman gerusan berubah-ubah akibat adanya sedimen yang masuk dan keluar. Gambar 2.5. Menunjukkan bahwa kedalaman gerusan untuk *clear water scour* dan *live-bed scour* merupakan fungsi dari kecepatan geser.

Keseimbangan gerusan tergantung pada keadaan yang ditinjau yaitu gerusan dengan air tanpa sedimen atau gerusan dengan air bersedimen. Pada *clear water scour* gerakan dasar sungai diasumsikan hanya terjadi pada sekitar pilar. Kesetimbangan tercapai bila tegangan geser yang terjadi di dekat permukaan lubang gerusan sudah tidak mampu mengangkut material akibat gerusan yang semakin dalam dan cenderung material dasar pada *clear water scour* adalah material kasar.

Pada keadaan *live bed scour* kedalaman gerusan bertambah secara cepat dan mencapai nilai keseimbangan apabila jumlah angkutan sedimen yang keluar dari lubang gerusan sama dengan jumlah sedimen yang masuk kedalam lubang ($Q_{s,in} = Q_{s,out}$) gerakan dasar sungai terjadi pada hampir di sepanjang sungai. Gerusan lokal dipengaruhi langsung dari akibat bentuk pola aliran.

Menurut Garde dan Raju (1977), penggerusan lokal terjadi akibat adanya turbulensi air yang disebabkan terganggunya aliran, baik besarnya maupun arahnya, sehingga menyebabkan hanyutnya material-material dasar atau tebing sungai. Turbulensi disebabkan oleh berubahnya kecepatan terhadap tempat, waktu dan keduanya. Penggerusan lokal pada material dasar dapat terjadi secara langsung oleh kecepatan aliran sedemikian rupa sehingga daya tahan material terlampaui.

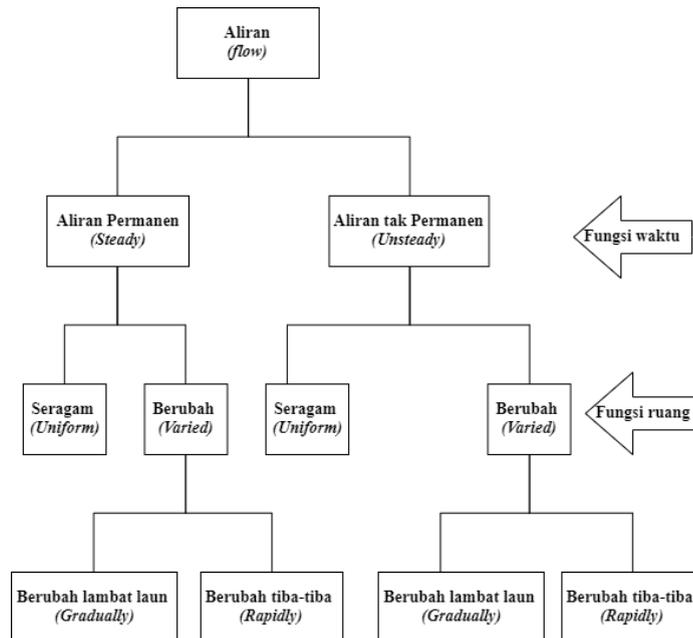
2.2. Hidrodinamika Aliran

Tipe aliran saluran terbuka menurut Triatmodjo (2008) adalah turbulen, karena kecepatan aliran dan kekasaran dinding relatif besar. Aliran melalui saluran terbuka akan turbulen apabila angka Reynolds $Re > 1.000$, dan laminar apabila $Re < 500$.

Aliran permanen (*Steady flow*) atau disebut juga aliran mantap adalah aliran dimana variabel aliran di suatu titik seperti kedalaman (Y_0), debit (Q) dan kecepatan rata-rata (v_0) pada setiap penampang tidak berubah sepanjang waktu atau bisa ditulis $\frac{\partial f}{\partial t} = 0$, dengan $f(Y_0, Q, v_0)$. Apabila variabel Y_0 , Q , dan v_0

berubah terhadap waktu, aliran itu adalah aliran tidak permanen (*Unsteady Flow*) atau aliran tidak mantap.

Sedangkan aliran seragam (*Uniform Flow*) adalah aliran dimana tampang basah (P_0), kedalaman (Y_0), debit (Q) dan kecepatan rata-rata (v_0) tidak berubah sepanjang saluran, $\frac{\partial f}{\partial x} = 0$, dengan $f(P_0, Y_0, Q, v_0)$. Selain itu aliran seragam mempunyai ciri yaitu garis energi, muka air dan dasar saluran saling sejajar dan jika sebaliknya aliran itu disebut aliran tidak seragam (*Non-Uniform Flow* atau *varied flow*). Pernyataan ini ditulis oleh K. G. Ranga Raju, 1981 dalam bukunya aliran pada saluran terbuka. Apabila perubahan aliran terjadi pada jarak yang pendek maka disebut aliran berubah cepat, sedangkan apabila terjadi pada jarak yang panjang disebut aliran berubah lambat laun. Untuk lebih jelasnya tentang pengklasifikasian aliran, dapat dilihat pada Gambar 2.6. diagram klasifikasi aliran menurut Chow dan Gunawan (2006):



Gambar 2.6. Klasifikasi Aliran Pada Saluran Terbuka

(Sumber: Chow dan Gunawan, 2006 dalam okky martono wibowo pengaruh aliran terhadap gerusan lokal)

Di laboratorium digunakan asumsi bahwa fluida memiliki karakteristik aliran seragam permanen (*Steady-Uniform Flow*) yaitu variabel aliran berupa kedalaman, debit dan kecepatan rata-rata tidak berubah sepanjang waktu dan

saluran. Menurut Kironoto (1995), pengaruh dinding flume adalah adanya suatu aspek rasio yaitu perbandingan lebar terhadap kedalaman aliran (B/Y_0).

Menurut persamaan kontinuitas suatu debit tertentu (Q), yang mempunyai kecepatan aliran rerata (v_0), melewati suatu penampang saluran dengan kedalaman aliran (Y_0) dan lebar saluran (B), dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$v_0 = \frac{Q}{B \cdot Y_0} \dots \dots \dots (2.1)$$

Keterangan:

Q = debit (m^3/s)

B = Lebar Saluran (m)

Y_0 = Kedalaman aliran (m)

Dalam pengujian ini diusahakan kondisi aliran seragam, sehingga kemiringan garis energi (S_f), muka air (S_w) dan dasar saluran (S_0) mempunyai kemiringan yang sama. Menurut Chow (1959), interaksi gaya gravitasi dan gaya inersia terhadap aliran dinyatakan dengan rasio gaya inersia dengan gaya gravitasi, g . Rasio ini diterapkan sebagai bilangan Froude (Fr) dengan persamaan sebagai berikut:

$$Fr = \frac{v_0}{\sqrt{g \cdot Y_0}} \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan:

v_0 = Kecepatan aliran rerata (m/s)

g = Percepatan gravitasi (9,81 atau 10 m/s^2)

Y_0 = Kedalaman aliran (m)

Bilangan Froude dapat digunakan untuk menentukan regime aliran yang terjadi pada saluran. bentuk aliran dapat dibagi menjadi 3 kategori (Rinaldi, 2002) yaitu:

1. Jika $Fr < 1$ maka dinamakan aliran sub-kritis (mengalir). Pada aliran sub-kritis peranan gaya tarik bumi lebih menonjol, sehingga aliran mempunyai kecepatan rendah dan sering dikatakan tenang.

2. $Fr = 1$ dinamakan aliran kritis. Kedalaman aliran pada bentuk aliran ini adalah kedalaman kritis.
3. $Fr > 1$ maka dinamakan aliran super kritis (meluncur). Dalam keadaan ini gaya-gaya inersia sangat menonjol, sehingga aliran mempunyai kecepatan tinggi dan kedalaman aliran pada regime ini lebih kecil dari kedalaman kritis.

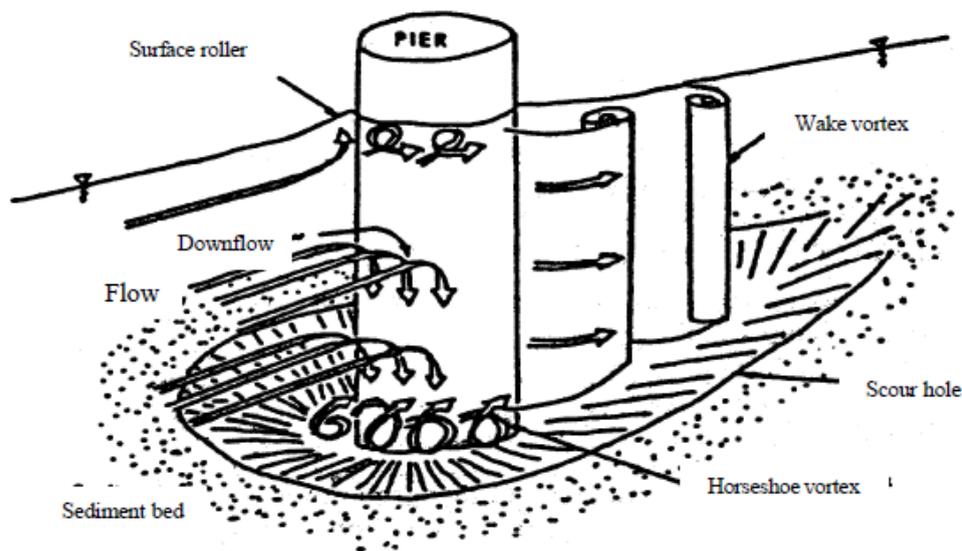
2.3. Mekanisme Gerusan di Sekitar Pilar

Menurut Graf (1971) dalam Breusers & Raudkivi (1991) gerusan dimulai di depan pilar. Namun sebelumnya terbentuk lebih dahulu dua lubang gerusan yang kecil di sisi pilar. Secara cepat keduanya bergerak di sekitar pilar dan bertemu di depan pilar. Lubang gerusan bertambah kedalaman dan volumenya dan membentuk alur. Bagian hilir dari lubang gerusan membentuk permukaan seperti kerucut yang terbalik, memanjang di sekitar pilar dengan kemiringan sisi kurang lebih sama dengan sudut kestabilan dari material. Kemudian pengikisan material terangkut menuju bagian belakang pilar, dimana material dapat terdeposisi ataupun tidak.

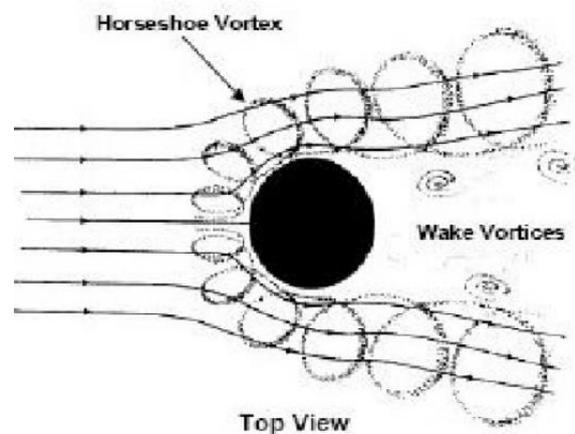
Gerusan lokal umumnya terjadi pada alur sungai yang terhalang pilar jembatan sehingga menyebabkan terjadinya pusaran pada pilar jembatan di bagian hulu pilar. Menurut Isnugrohho (1992) dalam Suyitno (1998) adanya pilar akan mengganggu kestabilan material dasar. Gerusan yang terjadi di sekitar pilar jembatan adalah akibat sistem pusaran (*Vortex System*).

Vortex System timbul karena keberadaan pilar yang merintang aliran. *Vortex System* yang menyebabkan lubang gerusan, berawal dari sebelah hulu pilar yaitu pada saat mulai timbul komponen aliran ke arah bawah. Karena aliran yang datang dari hulu dihalangi oleh pilar, maka aliran akan berubah yang awalnya horizontal menjadi arah vertikal menuju dasar saluran dan sebagian berbelok arah menuju sisi depan pilar dan diteruskan ke hilir. Di dekat dasar saluran, aliran vertikal tersebut akan berbalik arah vertikal ke atas dan membentuk pusaran, peristiwa ini diikuti dengan terbawanya material dasar sehingga terbentuk aliran spiral yang menyebabkan gerusan dasar, Proses ini akan terus terjadi hingga mencapai keseimbangan.

Sistem pusaran akan memanjang ke arah hilir lubang gerusan, melewati sisi samping pilar. Aliran yang memisah ini membentuk sistem *wake vortex*. Wake Vortex adalah pola gelombang yang berputar pada permukaan air di hilir objek dalam aliran atau diproduksi oleh objek bergerak, contohnya kapal. Disebabkan oleh perbedaan kepadatan cairan di atas dan di bawah permukaan bebas atau tegangan permukaan. Setelah proses itu terjadi secara terus menerus terbentuklah gerusan di sekitar pilar dengan pola tapal kuda atau *horseshoe*. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat mekanisme aliran yang terjadi pada pilar:



Gambar 2.7. Pola Aliran Dan Gerusan Di Sekitar Pilar Jembatan
(Sumber: Breusers dan Raudkivi, 1991 dalam yulia eka safitri penggunaan tiras pada gerusan pilar)



Gambar 2.8. Mekanisme Aliran Akibat Pola Aliran Air Di Sekitar Pilar
(Sumber: Miller, 2003 dalam Sarra rahmadani dan Ir Terunajaya, M.Sc Mekanisme Gerusan Lokal Dengan Variasi Bentuk Pilar)

Menurut Raudkivi dan Ettema (1983), kedalaman keseimbangan gerusan (*equilibrium scour depth*) tergantung pada kondisi yang ditinjau yaitu *clear-water scour* atau *live-bed scour*. Pada *clear-water scour* gerakan material dasar diasumsikan hanya terjadi di sekitar pilar, keseimbangan tercapai bila tegangan geser yang terjadi di dekat permukaan lubang gerusan (*scour hole*) sudah tidak mampu untuk mengangkat material. Sedangkan pada *Live-bed scour* gerakan material dasar terjadi pada hampir disepanjang dasar saluran, keseimbangan dicapai pada saat jumlah angkutan material sedimen yang masuk kedalam lubang gerusan sama dengan jumlah angkutan material sedimen yang keluar dari daerah lubang gerusan. Kedalaman gerusan maksimum terjadi pada saat kecepatan geser sama dengan kecepatan geser kritisnya.

2.4. Awal Gerak Butiran

Shield (1936) dalam Hoffmans dan Verheij (1997) menggambarkan fenomena pergerakan butiran awal dengan menggunakan parameter sebagai berikut:

1. Massa jenis zat cair (*fluid density*)
2. Massa jenis sedimen (*sediment density*)
3. Viskositas kinematik (*kinematic viscosity*)
4. Ukuran butiran (*grain size*)
5. Tegangan geser dasar saluran (*bed shear-stress*)

Menurut Garde dan Raju (1977), pergerakan awal butiran sedimen didasari atas pertimbangan suatu kasus aliran pada saluran terbuka, yaitu saluran dengan kemiringan tertentu dan dasar terdiri dari material seragam tidak kohesif, aliran dalam keadaan seragam dan tetap (*steady uniform flow*). Permukaan aliran dengan debit sangat kecil dan kemudian kondisi dasar saluran diamati, maka diperoleh material dasar tidak bergerak. Kondisi seperti ini disebut *fixed bed*.

Jika aliran debit bertambah, maka diperoleh suatu pergerakan acak (*random motion*) dari partikel-partikel pada dasar saluran, dengan kata lain kondisi aliran semacam itu menunjukkan karakteristik pergerakan awal, kondisi ini dikenal sebagai kondisi pergerakan kritis (*critical motion*) atau kondisi pergerakan awal butiran sedimen (*incipient motion of the sedimentary particles*).

Gerusan yang terjadi pada suatu sungai terlepas ada dan tidaknya bangunan sungai selalu berkaitan dengan peristiwa transpor sedimen. Transpor sedimen merupakan suatu peristiwa terangkutnya material dasar sungai yang terbawa aliran sungai. Menurut Kironoto (1997) dan Mira (2004), Karena adanya aliran air, maka akan timbul gaya-gaya aliran yang bekerja pada material sedimen. Untuk material sedimen kasar (pasir dan batuan), gaya perlawanan aliran tergantung pada berat batuan sedimen. Sedangkan untuk sedimen halus seperti tanah lanau (silt) atau lempung (clay), gaya perlawanan terhadap aliran tergantung oleh besar nilai kohesinya. Jika gaya-gaya aliran (gaya hidro-dinamik) yang bekerja pada suatu partikel sedimen mencapai suatu nilai tertentu sehingga menyebabkan butiran sedimen bergerak, maka kondisi ini disebut kondisi kritik.

Parameter aliran pada kondisi tersebut seperti tegangan dasar (τ_0), kecepatan aliran (v_0), yang juga akan mencapai kondisi kritisnya. Apabila gaya-gaya aliran dibawah nilai kritisnya, maka butiran sedimen tidak bergerak dan dasar saluran dapat dikatakan sebagai saluran dengan dasar *rigid bed*. Gaya hambat yang biasa disebut sebagai tegangan geser dasar, τ_0 dinyatakan sebagai berikut:

$$\tau_0 = \rho g h S \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan:

τ_0 = Tegangan geser dasar (N/m^2)

ρ = massa jenis air (kg/m^3)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

h = Kedalaman aliran (m)

S = Kemiringan saluran

Shield (1936) dalam Hoffman dan Verheij (1997), memberikan analisis dimensi untuk menentukan beberapa parameter tak berdimensi dan ditetapkan dalam bentuk diagram pergerakan awal (*incipient motion*). Melalui grafik Shield, dengan mengetahui bilangan Reynold, R_e atau diameter butiran, d maka nilai tegangan geser kritis, τ_0 dapat diketahui. Grafik Shield mendefinisikan gerak awal menjadi persamaan berikut:

$$\theta_c = \frac{\tau_c}{\rho g \Delta d} = \frac{v_{*c}^2}{g \Delta d} \dots \dots \dots (2.4)$$

Keterangan:

τ_c = Tegangan geser kritis (N/m²)

θ_c = Parameter mobilitas kritis (dari grafik Shield)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

ρ = massa jenis air (kg/m³)

d = diameter partikel (m)

Δ = Selisih kerapatan relatif

v_{*c} = kecepatan geser kritis saat butiran mulai bergerak (m/s)

Untuk mencari kecepatan geser:

$$v_* = \left(\frac{\tau_0}{\rho}\right)^{0,5} \dots \dots \dots (2.5)$$

Keterangan:

τ_0 = Tegangan geser dasar (N/m²)

ρ = massa jenis air (kg/m³)

v_* = Kecepatan geser (m/s)

Untuk mencari kecepatan geser kritis:

$$v_{*c} = \sqrt{\theta_c g \Delta d} \dots \dots \dots (2.6)$$

Keterangan:

v_{*c} = kecepatan geser kritis saat butiran mulai bergerak (m/s)

θ_c = Parameter mobilitas kritis (dari grafik Shield)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

d = diameter butiran (m)

Δ = selisih kerapatan relatif

Untuk mencari kecepatan kritis cara 1:

$$v_c = v_{*c} \left(5,75 \log \left(\frac{Y_0}{2 d_{50}}\right) + 6\right) \dots \dots \dots (2.7)$$

Keterangan:

v^*c = kecepatan geser kritis saat butiran mulai bergerak (m/s)

Y_0 = Kedalaman aliran (m)

d_{50} = diameter butiran lolos saringan 50 % (mm)

Untuk mencari kecepatan kritis cara 2:

$$v_c = \frac{q}{y_c} \dots \dots \dots (2.8)$$

Keterangan:

q = Debit tiap satuan lebar ($m^3/s/m$)

Y_c = Kedalaman kritis (m)

Untuk mencari debit tiap satuan lebar:

$$q = \frac{Q}{B} \dots \dots \dots (2.9)$$

Keterangan:

Q = Debit (m^3/s)

B = lebar saluran (m)

Untuk saluran persegi kedalaman kritis dapat dihitung:

$$y_c = \frac{2}{3} E_s \dots \dots \dots (2.10)$$

Keterangan:

E_s = Energi Spesifik (m)

Untuk mencari Energi Spesifik:

$$E_s = y + \frac{q^2}{2g y^2} \dots \dots \dots (2.11)$$

Keterangan:

y = Kedalaman Aliran (m)

q = Debit tiap satuan lebar ($m^3/s/m$)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

Untuk mencari angka Reynold:

$$R_e = \frac{\rho v_s L}{\mu} = \frac{v_s L}{\nu} \dots\dots\dots(2.12)$$

Keterangan:

ρ = kerapatan (densitas) fluida (kg/m^3)

v_s = kecepatan aliran (m/s)

L = panjang karakteristik (m)

μ = viskositas absolut fluida dinamis (N.s/m^2)

$\nu = (\nu = \frac{\mu}{\rho})$ viskositas kinematik fluida (m^2/s)

Berikut ditampilkan Tabel 2.1. merupakan tabel viskositas kinematik pada tekanan atmosfer:

Tabel 2.1. Viskositas Kinematik Pada Tekanan Atmosfer

suhu	Viskositas Kinematik (ν)	Suhu	Viskositas Kinematik (ν)
$^{\circ}\text{C}$	m^2/dt	$^{\circ}\text{C}$	m^2/dt
0	$1,795 \times 10^{-6}$	50	$0,556 \times 10^{-6}$
5	$1,519 \times 10^{-6}$	60	$0,477 \times 10^{-6}$
10	$1,308 \times 10^{-6}$	70	$0,415 \times 10^{-6}$
20	$1,007 \times 10^{-6}$	80	$0,367 \times 10^{-6}$
30	$0,804 \times 10^{-6}$	90	$0,328 \times 10^{-6}$
40	$0,661 \times 10^{-6}$	100	$0,296 \times 10^{-6}$

(Sumber: Bambang Triatmojo 1996:15)

Untuk mencari tegangan geser kritis:

$$\tau_c = \theta_c g \Delta d \dots\dots\dots(2.13)$$

Keterangan:

τ_c = Tegangan geser kritis (N/m^2)

θ_c = Parameter mobilitas kritis (dari grafik Shield)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

d = diameter partikel (m)

Δ = selisih kerapatan relatif

Untuk mencari selisih massa relatif:

$$\Delta = \rho_s - \rho \dots\dots\dots(2.14)$$

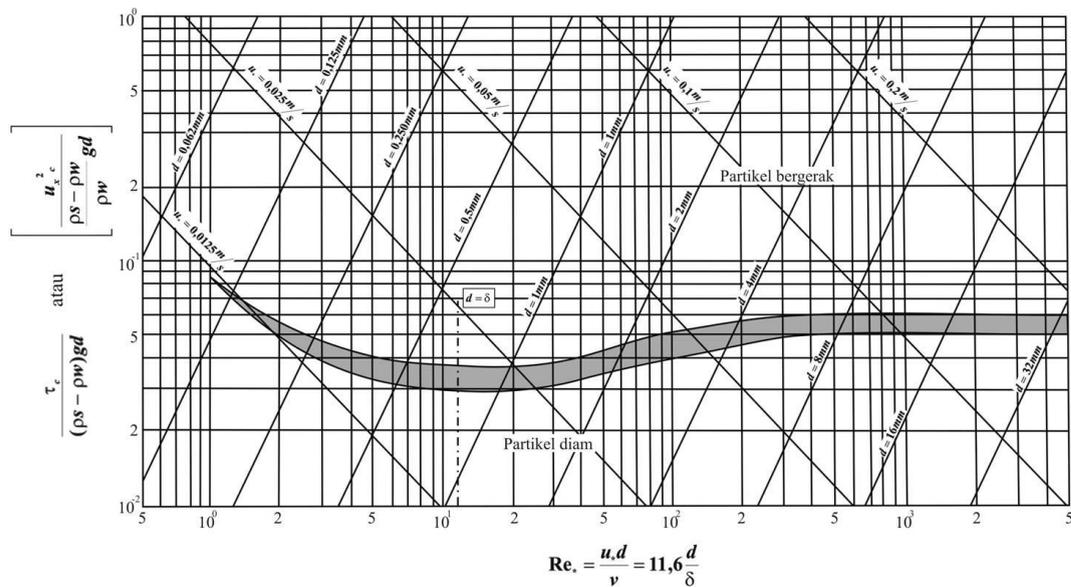
Keterangan:

ρ_s = Massa jenis butiran (Kg/m^3)

ρ = Massa jenis air (Kg/m^3)

Δ = selisih kerapatan relatif

Untuk mencari koefisien Shield (θ_c) kita dapat menggunakan grafik Shield, dengan melihat angka reynold, diameter butiran dan kecepatan geser didalam aliran sungai tersebut. Pada Gambar 2.9. merupakan grafik Shield yang digunakan untuk menentukan nilai koefisien Shield (θ_c).



Gambar 2.9. Grafik Shields Untuk Awal Gerak Butiran Sedimen (Air Jernih)

(Sumber: Breusers dan Raudkivi, 1991 dalam jaji abdurosyid kajian gerusan abutment)

Melalui grafik Shields, dengan mengetahui bilangan reynold (R_e) dan diameter butiran (d), maka nilai tegangan geser kritis (τ_c) dapat diketahui. Bila tegangan geser aliran berada dibawah nilai kritisnya maka butiran sedimen tidak bergerak. Sebaliknya bila tegangan geser aliran melebihi nilai kritisnya maka butiran sedimen bergerak. Berikut ini beberapa keadaan dimana kita bisa berasumsi butiran dasar bergerak atau tidak:

1. $v^* > v^*c$ butiran dasar tidak bergerak atau berpindah
2. $v^* = v^*c$ butiran dasar saat mau bergerak atau berpindah
3. $v^* < v^*c$ butiran dasar bergerak atau berpindah

2.5. Material dasar

Distribusi butiran sedimen dapat digambarkan melalui analisis ayakan (*grain size analysis*). Kurva distribusi butiran sedimen merupakan hubungan antara ukuran butiran (*grain diameter*) sebagai koordinat x dan persen lolos kumulatif (*percent finer*) sebagai koordinat y. Keseragaman butiran sedimen dalam suatu gradasi dapat dinyatakan dengan koefisien keseragaman, C_u (*coefficient of uniformity*), dan untuk mengetahui bentuk kurva gradasi butiran dinyatakan dengan koefisien gradasi, C_g (*coefficient of gradation*). Koefisien keseragaman merupakan fungsi dari diameter butiran yang lolos 60 % dan 10 %, dan dinyatakan sebagai:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \dots \dots \dots (2.15)$$

Keterangan:

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

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

C_u = *coefficient of uniformity*

Sedangkan koefisien gradasi merupakan fungsi dari diameter butiran dengan presentase lolos saringan 10%, 30%, dan 60%, dan dinyatakan sebagai :

$$C_g = \frac{d_{30}^2}{(d_{10})(d_{60})} \dots \dots \dots (2.16)$$

Keterangan:

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

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

d_{30} = diameter butiran lolos saringan 30% (mm)

C_g = *coefficient of gradation*

Berdasarkan komposisi butiran yang menyusun suatu gradasi dibagi menjadi dua bentuk, yaitu kurva bergradasi seragam dan kurva bergradasi tidak seragam. Untuk material pasir, kurva dikatakan bergradasi seragam jika $C_u > 6$ dan $1 < C_g < 3$, diluar dari ketentuan tersebut maka kurva dikategorikan bergradasi tidak seragam.

2.6. Gerusan Pilar Jembatan

Faktor – faktor yang mempengaruhi kedalaman gerusan yang terjadi di sekitar pilar jembatan sebagai berikut:

1. Kecepatan aliran pada alur sungai

Kedalaman gerusan lokal maksimum rerata di sekitar pilar sangat tergantung pada kecepatan aliran (perbandingan antara kecepatan rerata aliran dan kecepatan geser), nilai diameter butiran (butiran seragam/tidak seragam) dan lebar pilar. Parameter aliran yang dipakai untuk membedakan mekanisme gerusan lokal adalah rasio kecepatan aliran terhadap kecepatan aliran kritis transpor sedimen v_0/v_c yaitu:

- Apabila $v_0/v_c < 0,50$ tidak terjadi adanya gerusan lokal dan tidak terjadi transpor sedimen pada daerah sekitar pilar.
- Apabila $0,50 > v_0/v_c > 1,0$ penyebab utama terjadinya proses gerusan adalah *clear water scour* dan akan terjadi gerusan lokal di daerah sekitar pilar namun tidak terjadi transpor sedimen.
- Apabila $v_0/v_c > 1,0$ penyebab utamanya adalah *live bed scour* karena proses transportasi sedimen berlangsung terus akan tetapi tidak menimbulkan dampak sampai tergerusnya dasar disekitar pilar, berarti pada daerah tersebut terjadi keseimbangan antara pengendapan dan erosinya.

Pada kondisi *clear water scour* ($v_0/v_c < 1,0$) pengaruh kecepatan aliran sangat dominan.

Menurut Chabert dan Engeldinger (1956) dalam Anwar (1999) menyimpulkan bahwa kedalaman gerusan maksimum diperoleh pada kecepatan yang mendekati kecepatan aliran kritis, sedangkan gerusan mulai kira-kira pada setengah kecepatan aliran kritis.

2. Ukuran butiran

Ukuran butir sedimen merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kedalaman gerusan pada kondisi air bersih (*Clear water scour*). Kedalaman gerusan (Y_s/b) tak berdimensi merupakan fungsi dari karakteristik ukuran butiran material dasar (σ/d_{50}). Dimana σ adalah standar deviasi untuk ukuran butiran dan

d_{50} adalah ukuran partikel butiran rerata. Dengan demikian nilai standar deviasi geometrik (σ_g) dari distribusi ukuran butiran material dasar akan berpengaruh pada kedalaman gerusan. Distribusi ukuran partikel menurut Raudkivi (1991) dalam Gunawan (2006) dinyatakan dalam diameter rata-rata geometrik (d_{50}), dan standar deviasi geometrik (σ_g) adalah sebagai berikut:

$$\sigma_g = \left(\frac{d_{84}}{d_{50}}\right)^{0,5} \dots\dots\dots(2.17)$$

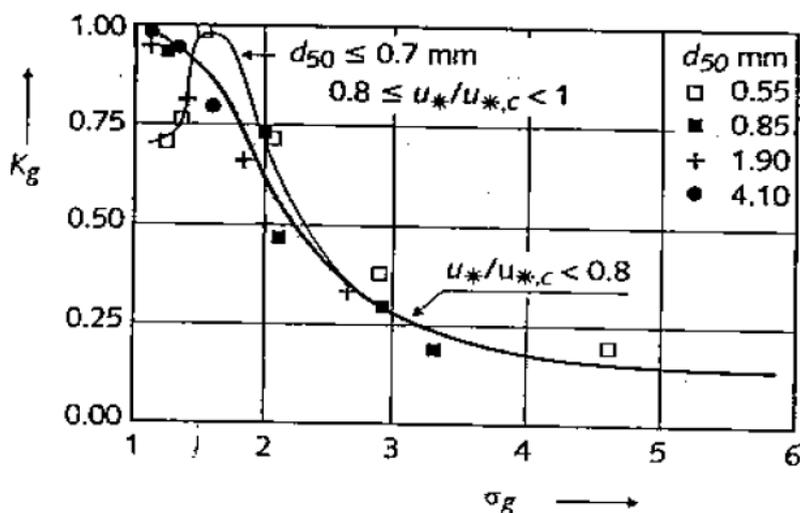
Keterangan:

σ_g = standar deviasi geometrik

d_{84} = diameter butiran lolos saringan 84 % (mm)

d_{50} = diameter butiran lolos saringan 50 % (mm)

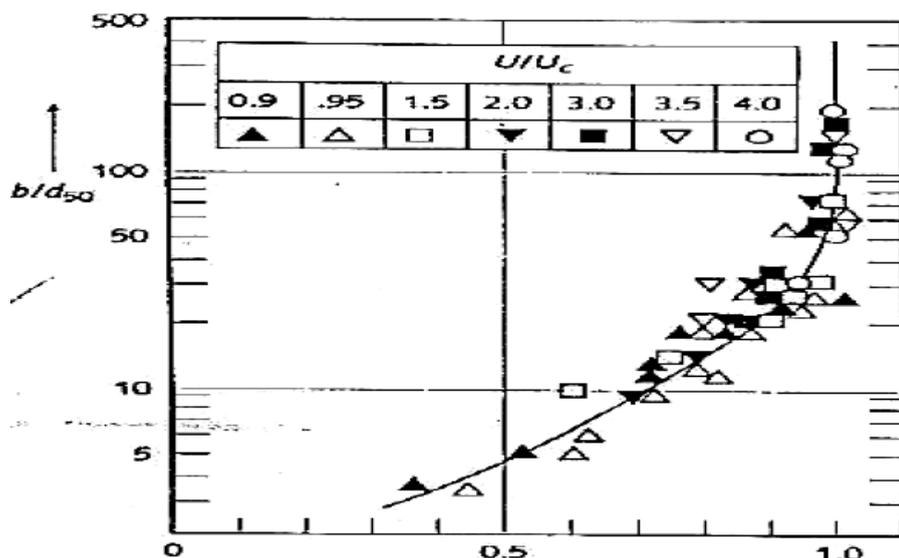
Dari hasil perhitungan standar deviasi geometrik, koefisien simpangan baku (K_σ) dapat dicari menggunakan grafik pada Gambar 2.10. dengan cara menarik garis dari nilai standar deviasi geometrik (sumbu x) lalu singgungkan dengan kurva yang ada di grafik sesuai dengan perbandingan kecepatan geser dengan kecepatan geser kritis dan tarik garis ke sumbu y yang merupakan nilai koefisien simpangan baku. Ada dua jenis kurva, yaitu kurva pertama digunakan jika perbandingan kecepatan geser dengan kecepatan geser kritisnya ada di range 0,8 sampai dengan 1. Kurva yang kedua digunakan jika perbandingan kecepatan geser dengan kecepatan geser kritisnya kurang dari 0,8.



Gambar 2.10. Koefisien Simpangan Baku (K_σ) Fungsi Standar Deviasi Geometri Untuk Distribusi Ukuran Butir (σ_g)

(Sumber: Breusers dan Raudkivi, 1991 dalam yulia eka safitri kajian penggunaan tirai sebagai upaya pengendalian gerusan di sekitar pilar jembatan sungai)

Kedalaman gerusan maksimum pada media alir *clear-water* sangat dipengaruhi adanya ukuran butiran material dasar relatif b/d_{50} pada sungai alami maupun buatan. Pada sungai alami dengan kondisi *clear water* umumnya koefisien ukuran butir relatif b/d_{50} pada kecepatan relatif v_0/v_c sama dengan 0,90. Umumnya kedalaman gerusan relatif Y_{se}/b tidak dipengaruhi oleh besarnya ukuran butiran dasar sungai selama ukuran material dasar relatif $b/d_{50} > 25$. Volume lubang gerusan terbentuk mengelilingi pilar sehingga semakin lebar pilar semakin banyak gerusan dan semakin banyak pula waktu yang diperlukan untuk proses terjadinya gerusan. Untuk mencari koefisien pengaruh ukuran pilar dan ukuran butir material dasar (K_{dt}) dapat digunakan grafik pada Gambar 2.11. di bawah ini.



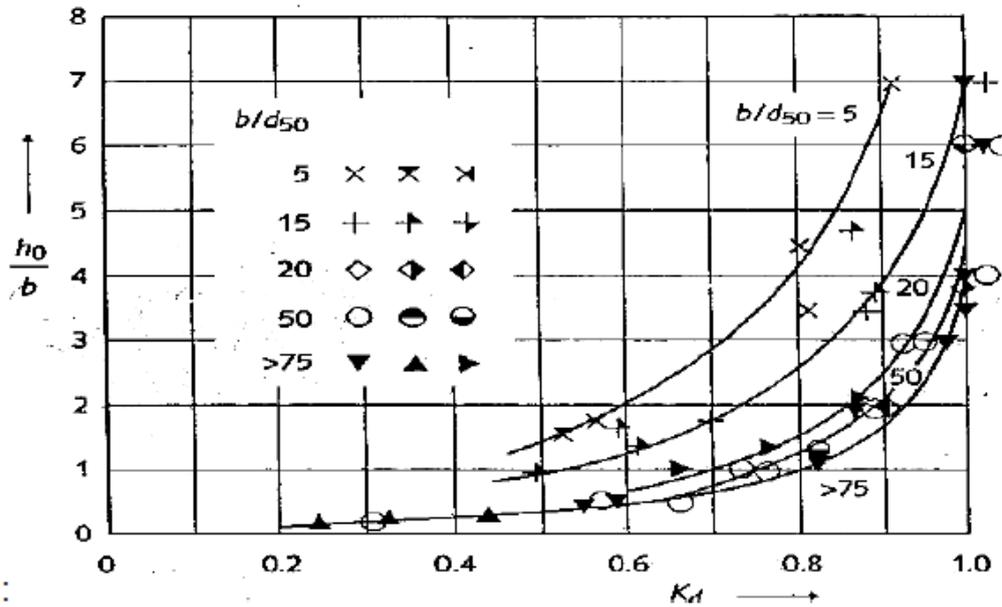
Gambar 2.11. Hubungan Koefisien Reduksi Ukuran Butir Relatif K_{dt} Dengan Ukuran Butir Relatif (b/d_{50}) Untuk Kondisi Air Bersih Dan Bersedimen

(Sumber: Breusers dan Raudkivi, 1991 dalam yulia eka safitri kajian penggunaan tirai sebagai upaya pengendalian gerusan di sekitar pilar jembatan sungai)

3. Kedalaman dasar sungai dan muka air

Dalamnya gerusan lokal yang terjadi dipengaruhi oleh kedalaman dasar sungai dari muka air (tinggi aliran zat alir), maka kecepatan relatif (v^*/v_{*c}) dan kedalaman relatif (Y_0/b) merupakan faktor penting untuk menghitung kedalaman gerusan lokal ini. Keseimbangan gerusan lokal pada aliran rendah akan tercapai jika telah terjadi kesamaan nilai v^*/v_{*c} dan Y_0/b , dan pengaruh dari Y_0/b tidak dapat dibedakan antara kondisi *clear water scour* dan *live bed scour*. Pada v^*/v_{*c} yang konstan, faktor pengaruh dari kedalaman aliran dapat diabaikan jika $Y_0/b \geq 2$,

sedangkan hubungan antara kedalaman relatif (Y_0/b) dan koefisien kedalaman air (K_d) dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12. Hubungan Antara Koefisien Kedalaman Aliran (K_d) dan Kedalaman Aliran Relatif (h_0/b) Dengan Ukuran Relatif Material Dasar (b/d_{50})

(Sumber: Breusers dan Raudkivi, 1991 dalam dalam yulia eka safitri kajian penggunaan tirai sebagai upaya pengendalian gerusan di sekitar pilar jembatan sungai)

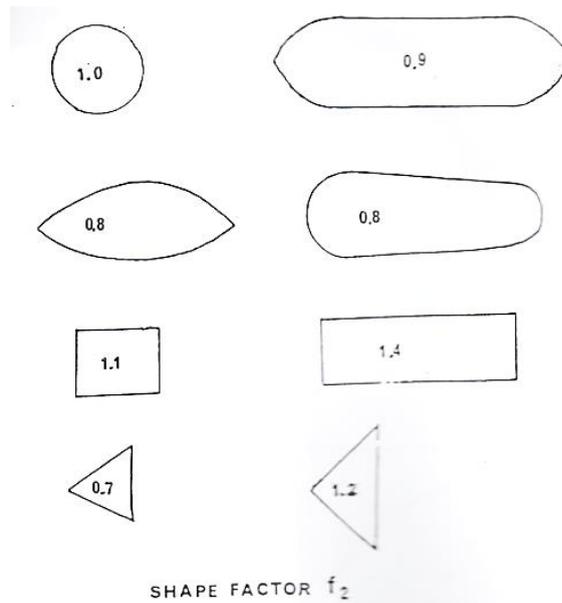
4. Bentuk pilar

Bentuk pilar akan berpengaruh pada kedalaman gerusan lokal, pilar jembatan yang tidak bulat akan memberikan sudut yang lebih tajam terhadap aliran yang datang yang diharapkan dapat mengurangi gaya pusaran tapal kuda sehingga dapat mengurangi besarnya kedalaman gerusan. Hal ini juga tergantung pada panjang dan lebar (l/b) pilar. Perkiraan besarnya gerusan lokal pada pilar jembatan yang tidak bulat dapat diperoleh dengan cara memberikan faktor pengali terhadap persamaan-persamaan yang digunakan untuk memperkirakan besarnya gerusan lokal. Masing-masing bentuk pilar mempunyai koefisien faktor bentuk K_s yang berbeda-beda menurut Dietz (1971) dalam Breusers dan Raudkivi (1991) di tujukan dalam Tabel 2.2. di bawah ini:

Tabel 2.2. Koefisien Bentuk Pilar

Bentuk Pilar	$\frac{b}{l}$	$\frac{b'}{l'}$	Ks	Gambar Bentuk Pilar
Silinder			1.0	
Persegi (<i>Rectangular</i>)	1 : 1 1 : 5		1.22 0.99	
Persegi dengan ujung setengah lingkaran (<i>rectangular with semi circular nose</i>)	1 : 3		0.90	
Ujung setengah lingkaran dengan bentuk belakang lancip (<i>semi circular nose with wedge shape tail</i>)	1 : 5		0.86	
Persegi dengan sisi depan miring (<i>rectangular with wedge shape nose</i>)	1 : 3	1 : 2 1 : 4	0.76 0.65	
Elips (<i>Elliptic</i>)	1 : 2 1 : 3 1 : 5		0.83 0.80 0.61	
<i>Lenticular</i>	1 : 2 1 : 3		0.80 0.70	
Aerofoil	1 : 3.5		0.80	

(Sumber : Breuser dan Raudkivi, 1991)



Gambar 2.13. Koefisien Bentuk Pilar

(Sumber: Buku *Bridge Scour* University Of Strathclyde, 1991 Strathclyde oleh Dr John Ridell dan Jim Graham)

Karakteristik *clear water scour*, penambahan kedalaman gerusan terbentuk secara perlahan-lahan dan kapasitas keluarnya tranpor sedimen pada lubang gerusan adalah nol. Pada *live bed scour*, kedalaman gerusan bertambah dengan cepat dan akan mencapai nilai keseimbangan, jika kapasitas keluarnya tranpor sedimen adalah sama dengan masuknya tranpor sedimen pada lubang gerusan.

5. Posisi pilar

Kedalaman gerusan lokal tergantung pada kedudukan/posisi pilar terhadap arah aliran yang terjadi serta panjang dan lebarnya pilar. Karena kedalaman gerusan merupakan rasio dari panjang dan lebar serta sudut dari tinjauan terhadap arah aliran. Karena posisi pilar digunakanlah koefisien sudut datang aliran pada beberapa bentuk tertentu. Hanya bentuk silinder yang tidak menggunakan koefisien sudut datang (Laursen dan Toch, 1956 dalam Breusers 2004:7).

Laursen dan Touch (1956), mempelajari koefisien sudut datang aliran pada pilar *rectangular horizontal croos section* dengan memberikan sudut kemiringaan terhadap aliran. Bila sudut terjang aliran terhadap pilar 0^0 maka $k_{\alpha} = 1$. Menurut Nagasaki dan Suzuki (1976) dalam Syafrina (2013) menyajikan beberapa pengujian gerusan disekitar pilar *rectangular horizontal croos section* dengan l/b

berkisar 1,75 dengan variasi sudut $0^{\circ} - 45^{\circ}$. Dari penelitian tersebut gerusan yang terjadi untuk sudut 30° hampir sama dengan 45° , namun lebih besar dari 0° yang mana:

$$k_{\alpha} = 1,3 - 1,8$$

$$k_{\alpha} = (\cos \alpha + Lp/b \sin \alpha)^{0,62} \dots\dots\dots(2.18)$$

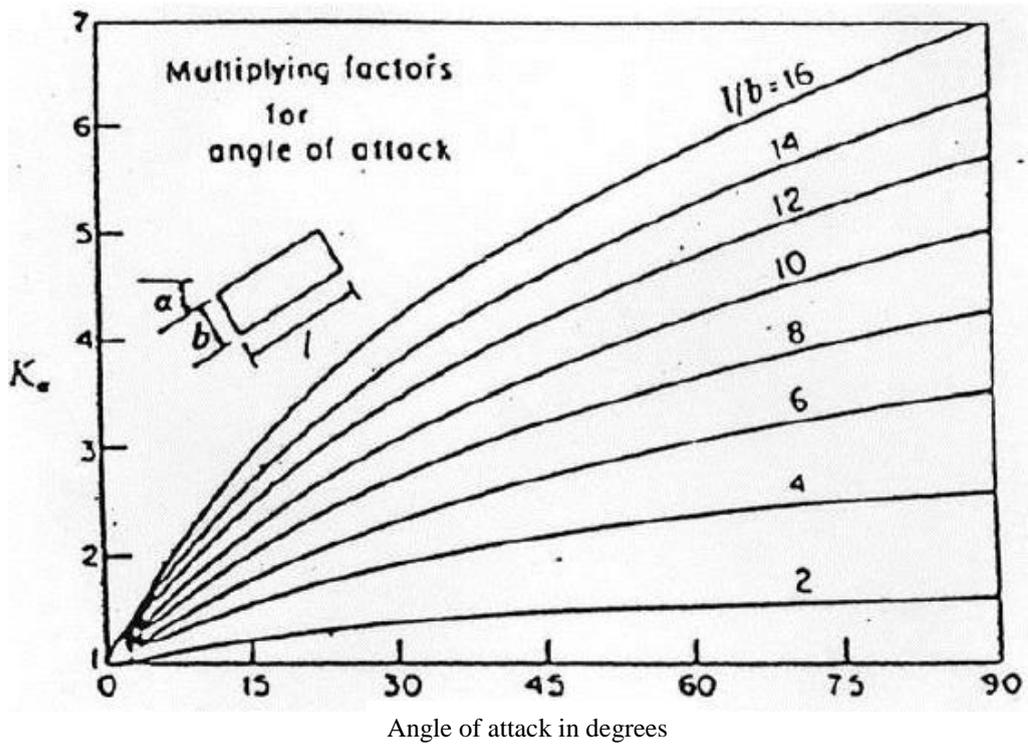
Keterangan:

α = sudut dari arah datangnya aliran

Lp = panjang pilar (m)

b = Lebar pilar (m)

Atau bisa digunakan grafik k_{α} yang dirumuskan oleh Breusers dan Raudkivi, 1991:



Gambar 2.14. Koefisien Arah Sudut Aliran (k_{α}) Pada Pilar

(Sumber: Breusers dan Raudkivi, 1991 dalam okky martono wibowo dalam pengaruh aliran terhadap gerusan lokal disekitar pilar jembatan)

2.7. Kedalaman Gerusan

Ada beberapa persamaan yang digunakan untuk menghitung kedalaman gerusan yang terjadi:

1. Kedalaman gerusan untuk kondisi *clear water scour* dan *live bed scour* persamaan dari Breusers (1977):

$$Y_{se} = 1,5 K_s b \tanh \left(\frac{y_0}{b} \right) \text{ untuk } v_0/v_c > 1 \dots\dots\dots(2.19)$$

$$Y_{se} = 2 K_s b \left(2 \left(\frac{v}{v_c} \right) - 1 \right) \tanh \left(\frac{y_0}{b} \right) \text{ untuk } 0,5 > v_0/v_c > 1 \dots\dots\dots(2.20)$$

Keterangan:

Y_{se} = kedalaman gerusan (m)

y_0 = kedalaman aliran (m)

K_s = koefisien bentuk pilar

v_0/v = kecepatan rerata aliran (m/s^2)

v_c = kecepatan aliran saat butiran mulai bergerak/kritis (m/s)

b = Lebar pilar (m)

2. Kedalaman gerusan dengan persamaan Colorado State University (CSU) dan Johnson (1992):

$$Y_{se} = 2 K_s Y_0 Fr^{0,43} \left(\frac{b}{y_0} \right)^{0,65} \dots\dots\dots(2.21)$$

Keterangan:

Y_{se} = kedalaman gerusan (m)

y_0 = kedalaman aliran (m)

K_s = koefisien bentuk pilar

Fr = Bilangan Froude

b = Lebar pilar (m)

3. Kedalaman gerusan dengan persamaan Johnson (1992) (modifikasi)

$$Y_{se} = 2,02 K_s Y_0 Fr^{0,21} \sigma_d^{-0,24} \left(\frac{b}{y_0} \right)^{0,98} \dots\dots\dots(2.22)$$

Keterangan:

Y_{se} = kedalaman gerusan (m)

y_0 = kedalaman aliran (m)

K_s = koefisien bentuk pilar
 Fr = Bilangan Froude
 b = Lebar pilar (m)
 σ_d = Faktor gradasi sedimen (d_{84}/d_{50})

4. Kedalaman gerusan Raudkivi 1991

$$Y_{se} = 2,3 K_s k_\sigma K_{dt} K_d k_\alpha \dots \dots \dots (2.23)$$

Keterangan:

Y_{se} = kedalaman gerusan (m)
 k_σ = koefisien simpangan baku
 K_s = koefisien bentuk pilar
 K_{dt} = koefisien pengaruh ukuran pilar dan ukuran butir material dasar
 K_d = koefisien kedalaman aliran
 k_α = koefisien sudut datang aliran

5. Dalam Melville dan Satherland (1988) dalam Syafrina telah dijelaskan, bahwa kedalaman gerusan dari gerusan lokal dapat ditulis:

$$Y_{se} = K_I K_s k_\sigma K_{dt} K_d k_\alpha \dots \dots \dots (2.24)$$

Dimana : $K_I = 2,4 \times (v/v_c)$ jika $(v/v_c) < 1$
 $K_I = 2,4$ jika $(v/v_c) > 1$

Keterangan:

Y_{se} = kedalaman gerusan (m)
 k_σ = koefisien simpangan baku
 K_s = koefisien bentuk pilar
 K_{dt} = koefisien pengaruh ukuran pilar dan ukuran butir material dasar
 K_d = koefisien kedalaman aliran
 k_α = koefisien sudut datang aliran
 K_I = koefisien intensitas aliran
 v_c = kecepatan aliran saat butiran mulai bergerak/kritis (m/s)
 v = kecepatan aliran rata-rata (m/s)

6. Kedalaman gerusan *clear water scour* menurut Shen (1972) dan Graff:

$$Y_{se} = 0,00022 \left(\frac{v D_p}{\nu} \right)^{0,609} \dots\dots\dots(2.25)$$

Keterangan:

Y_{se} = kedalaman gerusan (m)

v = Kecepatan aliran rata-rata (m/s)

D_p = Diameter pilar (m)

ν = viskositas kinematik (m^2/s)

7. Kedalaman gerusan menurut Laursen dan Toch (1956):

$$Y_{se} = 1,35 \cdot K_s \cdot b^{0,7} \cdot y^{0,3} \dots\dots\dots(2.26)$$

Keterangan:

K_s = Faktor Bentuk Pilar

b = Diameter Pilar (m)

y = Kedalaman Aliran (m)

2.8. Model dan analisis dimensi

Beberapa masalah teknik yang berhubungan dengan aliran fluida dan hidraulika, seringkali sulit atau tidak bisa diselesaikan secara analitis, atau dengan model Matematis. Pada kondisi seperti ini, tidak jarang diperlukan suatu percobaan atau pengamatan langsung di lapangan untuk menyelesaikan permasalahan tersebut. Pengamatan langsung di lapangan untuk masalah atau pekerjaan yang besar, seperti pekerjaan bangunan sungai, pelabuhan atau bangunan pelimpah, akan memakan biaya yang besar dan waktu yang lama.

Untuk menghindari kendala tersebut pengamatan bisa dilakukan dengan membuat bentuk miniatur dari permasalahan yang ada di laboratorium, yang dikenal dengan studi model. Model bisa lebih besar, sama besar atau yang biasa dilakukan adalah lebih kecil dari prototip. Bentuk sesungguhnya dari bangunan yang dipelajari disebut dengan *prototip*. Dalam perencanaan pekerjaan bangunan air, tidak sedikit persoalan atau permasalahan hidraulika yang tidak dapat dipecahkan dengan persamaan-persamaan yang sudah ada, hal ini disebabkan karena :

1. beberapa persamaan yang ada diturunkan pada suatu kondisi tertentu yang keadaannya belum tentu sama dengan kondisi bangunan air yang akan direncanakan.
2. Fenomena fisik dari permasalahan yang ada masih belum diketahui dengan baik. (bantuan model hidraulik sangat dibutuhkan dalam menyelesaikan permasalahan)

Model hidraulik yang biasa dipergunakan untuk membantu memecahkan permasalahan teknik hidraulik ada 4 macam, yaitu model matematis, model fisis, model analog dan model campuran (hybrid model).

1. Model matematis (*Mathematical modelling*).

Model matematis dibuat apabila permasalahan yang akan diteliti dapat dirumuskan dengan formulasi/persamaan matematik secara detail. Apabila permasalahan tersebut baru, dan belum diketahui dengan baik formulasi matematisnya maka permasalahan ini tidak dapat dipecahkan lewat model matematis.

2. Model fisik (*Hydraulic scale model, physical modelling*).

Model fisik dipilih untuk dibuat atau dilakukan apabila fenomena fisik dari permasalahan yang ada di prototip dapat dibuat dengan skala yang lebih kecil dengan kesebangunan yang cukup memadai.

Model fisik dapat diklasifikasikan dalam dua tipe yaitu model tak distorsi dan model distorsi.

1. Model tak distorsi :

- a. bentuk geometri antara model dan prototip adalah sama dengan suatu skala tertentu.
- b. relatif mudah pembuatan dan pengujian modelnya.
- c. hasil dari model mudah ditransfer ke prototip.

2. Model distorsi

- a. bentuk geometri antara model dan prototip tidak sama.

- b. dilakukan apabila prototip mempunyai dimensi horisontal \gg dari dimensi vertikal (misal : sungai, pelabuhan, dan lain lain).
- c. Bila skala V = skala H \rightarrow kedalaman aliran pada model akan sangat kecil, sehingga pengukuran menjadi sulit.
- d. Hasil yang diperoleh tidak mudah untuk ditransfer ke kondisi prototip.
- e. Model distorsi mempunyai skala horisontal dan vertikal berbeda ; $n_L =$ skala horisontal, $n_h =$ skala vertikal
 $n_L = L_p/L_m$; $n_h = h_p/h_m \rightarrow$ koefisien distorsi, $r = n_L/n_h$

Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam pembuatan model fisik:

- a. Ruang yang tersedia untuk membuat model.
- b. Kemampuan fasilitas suplai fluida (air, minyak, udara atau fluida lainnya).
- c. Kemampuan alat ukur.
- d. Cakupan dan jangkauan penyelidikan.
- e. Ketelitian yang dikehendaki.
- f. Ukuran prototip.
- g. Pelaksanaan pembuatan model.

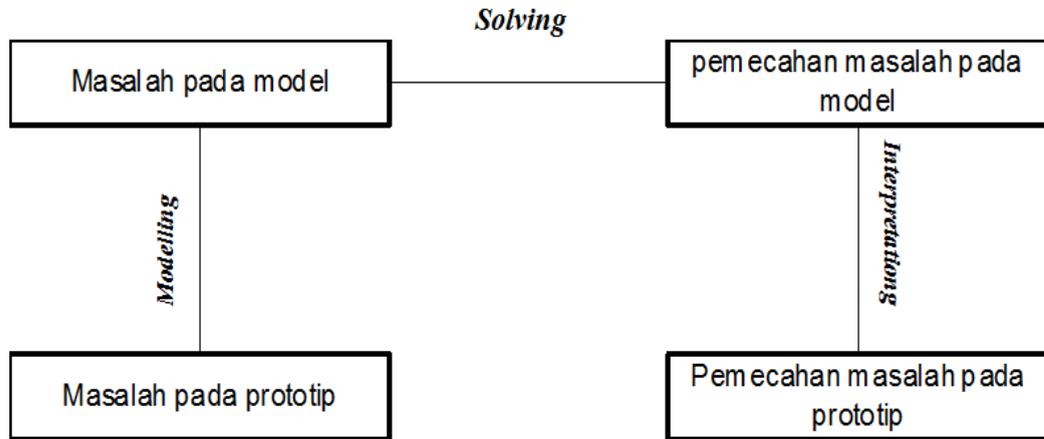
3. Model analog.

Model ini dibuat apabila permasalahan yang akan diteliti dapat dipindahkan menjadi permasalahan listrik yang berupa arus dan tegangan listrik.

4. Model campuran (*hybrid model*).

Model campuran adalah campuran antara model matematis dan model fisik atau sebaliknya. Model ini dipergunakan untuk masalah-masalah yang sangat rumit dan atau menyangkut masalah dana pembangunan yang sangat besar, dan atau menyangkut masalah sosial yang luas. Kadang-kadang dalam pelaksanaan model fisik juga memerlukan model matematis yang diperlukan sebagai masukan (*input*) atau penggerak sesuatu alat. Misalnya alat pengatur debit aliran tidak permanen memerlukan program matematik untuk mengatur gerak bukaan pintu air, agar supaya debit aliran bisa diatur sebagai fungsi waktu.

Penggunaan model untuk keperluan perencanaan bangunan-bangunan teknik hidraulik pada kenyataannya menggunakan cara melingkar seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.15. berikut.



Gambar 2.15. Penggunaan Model Untuk Keperluan Perencanaan Bangunan-Bangunan Teknik Hidraulik

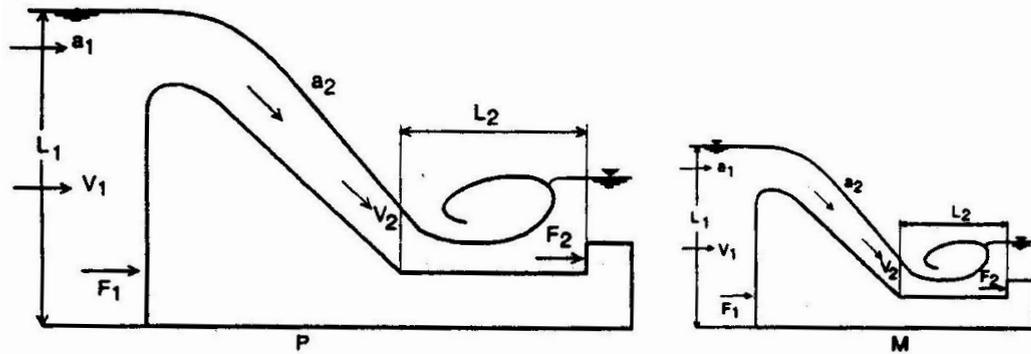
(Sumber: Model Analisis Dimensi oleh Kironoto)

Dalam modelisasi terdapat tiga kegiatan yang saling terkait yaitu: *modelling* (proses membuat model), *solving* (proses pemecahan masalah) dan *interpretation* (menginterpretasikan atau menjabarkan hasil penelitian dari model ke prototip). Agar supaya penelitian lewat model tersebut dapat memberikan hasil yang baik maka ketiga kegiatan tersebut haruslah memenuhi kaidah-kaidah yang benar, artinya harus memenuhi persyaratan-persyaratan tertentu, misalnya terpenuhinya sifat kesebangunan. Hubungan antara model dan prototip dipengaruhi oleh hukum-hukum sifat sebangun hidrolis.

Sifat sebangun ini memperhatikan beberapa aspek yaitu sebangun geometri, sebangun kinematik dan sebangun dinamik. Perbandingan antara prototip dan model disebut skala model. Hubungan antara model dan prototip diturunkan dengan skala, untuk masing masing parameter mempunyai skala tersendiri dan besarnya tidaklah sama. Skala dapat didefinisikan sebagai rasio antara nilai parameter yang ada di prototip dengan nilai parameter tersebut pada model. Dasar-dasar penskalaan model adalah membentuk kembali masalah yang ada di prototip dalam skala yang lebih kecil (model), sehingga kejadian (fenomena) yang ada di model tersebut sebangun (mirip) dengan yang ada di prototip.

Kesebangunan tersebut dapat berupa:

- a. sebangun geometrik (panjang, lebar, tinggi),
- b. sebangun kinematik (kecepatan, aliran), dan
- c. sebangun dinamik (yang berhubungan dengan gaya).



Gambar 2.16. Koefisien Arah Sudut Aliran (k_α) Pada Pilar
 (Sumber: Model Analisis Dimensi oleh kironoto)

Sebangun geometrik dipenuhi apabila model dan prototip mempunyai bentuk yang sama tetapi berbeda ukuran. Hal ini berarti bahwa perbandingan antara semua ukuran panjang adalah sama. Ada dua macam sebangun geometrik yaitu sebangun geometrik sempurna (tanpa distorsi) dan sebangun geometrik dengan distorsi (*distorted*). Pada sebangun geometri sempurna skala panjang arah horisontal (disingkat menjadi skala panjang) dan skala panjang arah vertikal (disingkat menjadi skala tinggi) adalah sama, sedangkan pada *distorted model*, skala panjang tidak sama dengan skala tinggi. Apabila dimungkinkan model dibuat dengan tanpa distorsi, sedangkan pada permasalahan khusus model dapat dilakukan dengan distorsi namun harus memenuhi persyaratan tertentu. Skala panjang pada umumnya diberi notasi n_L , sedangkan skala tinggi diberi notasi, n_h . Skala panjang dan tinggi dengan persamaan sebagai berikut:

$$n_l = \frac{L_p}{L_m} = \frac{\text{panjang pada prototip}}{\text{panjang pada model}} = \frac{(L_1)_p}{(L_1)_m} = \frac{(L_2)_p}{(L_2)_m} \dots\dots\dots(2.27)$$

$$n_h = \frac{h_p}{h_m} = \frac{\text{tinggi pada prototip}}{\text{tinggi pada model}} = n_l \dots\dots\dots(2.28)$$

Pada sebangun geometrik sempurna atau tak distorsi dapat ditentukan bahwa:

- 1. skala luas:

$$n_A = \frac{A_p}{A_m} = \frac{(\text{panjang} \times \text{lebar})_{\text{prototip}}}{(\text{panjang} \times \text{lebar})_{\text{model}}} = \frac{(L_1^2)_p}{(L_1^2)_m} = (n_l)^2 \dots\dots\dots(2.29)$$

2. skala volume:

$$n_V = \frac{V_p}{V_m} = \frac{(\text{panjang} \times \text{lebar} \times \text{tinggi})_{\text{prototip}}}{(\text{panjang} \times \text{lebar} \times \text{tinggi})_{\text{model}}} = \frac{(L_1^3)_p}{(L_1^3)_m} = (n_l)^3 \dots\dots\dots(2.30)$$

Pada sebangun geometri dengan distorsi:

1. Skala panjang dan tinggi (1 dimensi):

a. Skala panjang

$$n_L = \frac{L_p}{L_m} = \frac{(\text{panjang})_{\text{prototip}}}{(\text{panjang})_{\text{model}}} \dots\dots\dots(2.31)$$

b. Skala Tinggi

$$n_h = \frac{h_p}{h_m} = \frac{(\text{tinggi})_{\text{prototip}}}{(\text{tinggi})_{\text{model}}} \dots\dots\dots(2.32)$$

2. skala luas (2 dimensi):

a. posisi horizontal jika skala horizontal dan vertikalnya sama

$$n_A = \frac{A_p}{A_m} = \frac{(\text{panjang} \times \text{lebar})_{\text{prototip}}}{(\text{panjang} \times \text{lebar})_{\text{model}}} = (n_l)^2 \dots\dots\dots(2.33)$$

b. Posisi horizontal jika skala horizontal dan vertikalnya tidak sama

$$n_A = \frac{A_p}{A_m} = \frac{(\text{panjang} \times \text{lebar})_{\text{prototip}}}{(\text{panjang} \times \text{lebar})_{\text{model}}} = n_h \times n_h \dots\dots\dots(2.34)$$

3. Skala volume (3 dimensi):

$$n_V = \frac{V_p}{V_m} = \frac{(\text{panjang} \times \text{lebar} \times \text{tinggi})_{\text{prototip}}}{(\text{panjang} \times \text{lebar} \times \text{tinggi})_{\text{model}}} = (n_l)^2 \times n_h \dots\dots\dots(2.35)$$

Skala kecepatan biasanya diberi notasi n_v , skala percepatan n_a dan skala debit n_Q , dimana:

1. Skala kecepatan

$$n_v = \frac{v_p}{v_m} = \frac{n_l}{n_T} \text{ atau } \frac{n_h}{n_T} \dots\dots\dots(2.36)$$

2. Skala percepatan

$$n_a = \frac{a_p}{a_m} = \frac{n_l}{n_T^2} \text{ atau } \frac{n_h}{n_T^2} \dots\dots\dots(2.37)$$

3. Skala debit

$$n_Q = \frac{Q_p}{Q_m} = \frac{n_l^3}{n_T} \text{ atau } \frac{n_l^2 n_h}{n_T} \dots\dots\dots(2.38)$$

Bilangan froude dapat diekspresikan sebagai rasio antara gaya inersia dengan gaya gravitasi. Berikut ini perbandingan atau skala bilangan tak berdimensi yaitu bilangan froude untuk kesebangunan:

Persamaan bilangan froude:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g h}} \dots \dots \dots (2.39)$$

Rasio atau skala untuk bilangan Froude:

$$n_{fr} = \frac{n_v}{(n_h)^{\frac{1}{2}}} \dots \dots \dots (2.40)$$

Apabila gaya gravitasi dan gaya inersia sama-sama memegang peranan dalam permasalahan, maka rasio kedua gaya tersebut pada model dan prototip harus sama. Kriteria ini disebut kriteria sebangun menurut kondisi bilangan Froude.

$$n_{fr} = 1 \longrightarrow \frac{F_{rp}}{F_{rm}} = 1 \longrightarrow F_{rp} = F_{rm}$$

$$\frac{v_p}{\sqrt{g_p h_p}} = \frac{v_m}{\sqrt{g_m h_m}}$$

$$\frac{v_p}{v_m} = \frac{\sqrt{g_p h_p}}{\sqrt{g_m h_m}}$$

$$n_v = \left(\frac{g_p}{g_m}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{h_p}{h_m}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$n_v = 1 \times (n_h)^{\frac{1}{2}} = n_h^{\frac{1}{2}}$$

$$n_v = n_h^{\frac{1}{2}} = n_l^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (2.41)$$

Persamaan skala debit jika skala horizontal dan vertikalnya sama dapat dicari dengan persamaan:

$$n_Q = n_A n_v = n_l^2 \times n_l^{\frac{1}{2}} = n_l^{\frac{5}{2}} \dots \dots \dots (2.42)$$

Persamaan skala debit jika skala horizontal dan vertikalnya tidak sama dapat dicari dengan persamaan:

$$n_Q = n_A n_v = n_l \times n_h \times n_h^{\frac{1}{2}} = n_l \times n_h^{\frac{3}{2}} \dots \dots \dots (2.43)$$

Keterangan:

- n_L = Skala panjang atau horizontal
- n_h = Skala tinggi atau vertikal
- n_v = Skala kecepatan
- n_V = Skala volume
- n_Q = Skala debit
- n_t = Skala waktu
- L_p = Panjang prototip atau panjang dilapangan
- L_m = Panjang model atau panjang dilaboratorium

h_p	= Tinggi prototip atau tinggi dilapangan
h_m	= Tinggi model atau tinggi dilaboratorium
V_p	= volume prototip atau kecepatan dilapangan
V_m	= volume model atau kecepatan dilaboratorium
v_p	= Kecepatan prototip atau kecepatan dilapangan
v_m	= Kecepatan model atau kecepatan dilaboratorium
Fr	= Bilangan Froude
F_{rp}	= Bilangan Froude prototip
F_{rm}	= Bilangan Froude model
n_{fr}	= Skala bilangan Froude
v	= Kecepatan (m/s^2)
g	= Kecepatan gravitasi ($9,81 m/s^2$)
h	= Ketinggian (m)