

## CONTOH HITUNGAN TRANSPOR SEDIMEN BEDLOAD

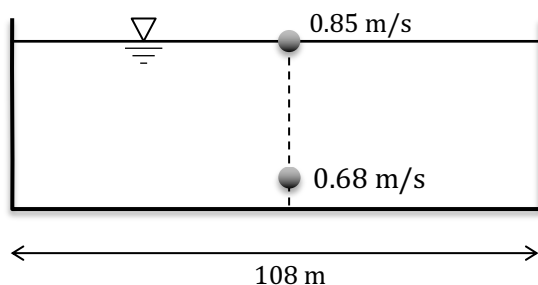
Sebuah sungai memiliki lebar 108 m, kedua tebing sungai tegak. Pada suatu aliran yang dapat dianggap sebagai aliran seragam dan permanen (*steady uniform flow*), diketahui kedalaman aliran adalah 5.75 m, kecepatan di permukaan aliran adalah 0.85 m/s, kecepatan di posisi 20% dari dasar sungai adalah 0.68 m/s. Dasar sungai terdiri dari pasir dan kerikil yang memiliki rapat massa  $2595 \text{ kg/m}^3$  dan komposisi ukuran butir:  $d_{35} = 1.2 \text{ mm}$ ,  $d_{50} = 1.5 \text{ mm}$ ,  $d_{65} = 2.2 \text{ mm}$ ,  $d_{90} = 9 \text{ mm}$ . *Void ratio* material dasar sungai 49%, rapat massa air  $1000 \text{ kg/m}^3$ , percepatan gravitasi  $9.8 \text{ m/s}^2$ , temperatur air  $20^\circ\text{C}$ .

- 1) Dari informasi kecepatan aliran dan tampang lintang aliran, hitunglah debit aliran.
  - Anggaphlah sifat aliran secara hidraulis adalah kasar.
  - Gunakan persamaan profil kecepatan aliran pada kecepatan aliran di kedua titik.
  - Jika kedalaman aliran kurang daripada 5% lebar sungai, maka friksi di tebing sungai dapat diabaikan, sehingga radius hidraulik sama dengan kedalaman aliran.
- 2) Tentukan kestabilan butir sedimen di dasar sungai.
- 3) Hitunglah kuantitas transpor sedimen dasar (bedload), dalam satuan  $\text{m}^3/\text{tahun}$ , menurut persamaan Meyer-Peter dan Müller (M-P&M) dan beberapa persamaan empiris lain.

Seluruh debit sungai tersebut akan mengalir melalui sebuah saluran bertampang trapesium yang memiliki kemiringan talud 3:4 (vertikal:horizontal). Kemiringan dasar saluran adalah  $6.7 \times 10^{-5}$ .

- 4) Hitunglah lebar dasar saluran trapesium jika kedalaman aliran dan koefisien kekasaran Chezy di saluran trapesium sama dengan kedalaman aliran dan koefisien kekasaran Chezy di sungai.
- 5) Hitunglah kapasitas transpor sedimen (bedload) di saluran menurut persamaan Einstein, dalam satuan  $\text{m}^3/\text{s}$ .
- 6) Hitung pula kapasitas transpor sedimen di saluran menurut persamaan Frijlink.
- 7) Apabila kapasitas transpor sedimen yang dihitung menurut kedua persamaan di atas disandingkan dengan kuantitas transpor sedimen di sungai, apakah kesimpulan yang dapat kita ambil?
- 8) Tentukan diameter minimum butir batu bulat yang diperlukan sebagai pelindung dasar saluran trapesium agar tidak terjadi erosi.

### PENYELESAIAN



Diketahui:

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$t_{\text{air}} = 20^\circ\text{C} \Rightarrow \nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$u_{5.75} = 0.85 \text{ m/s}, u_{1.15} = 0.68 \text{ m/s}$$

$$\rho_s = 2595 \text{ kg/m}^3, v.r. = 0.49$$

$$d_{35} = 1.2 \text{ mm}, d_{50} = 1.5 \text{ mm},$$

$$d_{65} = 2.2 \text{ mm}, d_{90} = 9.0 \text{ mm}$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

## MENGHITUNG DEBIT ALIRAN

Debit aliran merupakan perkalian antara luas tampang aliran dan kecepatan rerata. Luas tampang aliran telah diketahui dari geometri tampang sungai, yaitu segiempat yang memiliki lebar 108 m dan kedalaman 5.75 m. Kecepatan rata-rata tampang untuk aliran seragam dan permanen (*steady uniform flow*) dihitung dengan persamaan Manning atau Chezy.

$$U = C\sqrt{R_h S_e}$$

Tampak bahwa kecepatan rata-rata tampang merupakan fungsi koefisien kekasaran Chezy, radius hidraulik, dan kemiringan garis energi. Paragraf-paragraf di bawah ini memaparkan prosedur untuk menghitung ketiga variabel aliran ini.

Dengan asumsi bahwa secara hidraulik aliran di sungai tersebut adalah kasar (asumsi ini harus dibuktikan nanti), maka koefisien kekasaran Chezy dihitung dengan persamaan berikut:

$$C = 18 \log\left(\frac{12R_h}{k_s}\right)$$

Tampak bahwa koefisien kekasaran,  $C$ , merupakan fungsi radius hidraulik aliran,  $R_h$ , dan kekasaran dasar saluran,  $k_s$ . Radius hidraulik aliran adalah luas tampang basah dibagi dengan keliling basah aliran. Radius hidraulik tidak boleh dianggap sama dengan kedalaman aliran karena kedalaman aliran lebih besar daripada 5% lebar sungai ( $5.75 \text{ m} > 5.40 \text{ m}$ ).

$$R_h = \frac{A}{P} = \frac{108 \times 5.75}{108 + 2 \times 5.75} = 5.197 \text{ m}$$

Kekasaran dasar sungai  $k_s$  dicari berdasarkan data kecepatan di dua elevasi, yaitu kecepatan di permukaan aliran,  $z = 5.75 \text{ m}$ , dan di 20% kedalaman,  $z = 20\% \times 5.75 = 1.15 \text{ m}$ , serta profil logaritmik kecepatan aliran. Untuk aliran yang secara hidraulik termasuk kasar, maka profil kecepatan aliran dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$u_z = 5.75 u_* \log\left(\frac{33z}{k_s}\right)$$

Persamaan di atas memiliki dua variabel tak diketahui, yaitu kecepatan geser (*shear velocity*) atau kecepatan gesek (*friction velocity*),  $u_*$ , dan kekasaran dasar,  $k_s$ . Dengan data kecepatan aliran di dua elevasi, kedua variabel ini dapat dihitung.

$$\left. \begin{aligned} u_{5.75} &= 5.75 u_* \log\left(\frac{33 \times 5.75}{k_s}\right) = 0.85 \\ u_{1.15} &= 5.75 u_* \log\left(\frac{33 \times 1.15}{k_s}\right) = 0.68 \end{aligned} \right\} 5.75 u_* \log\left(\frac{5.75}{1.15}\right) = 0.17 \Rightarrow \begin{aligned} u_* &= 0.0423 \text{ m/s} \\ k_s &= 0.0607 \text{ m} \end{aligned}$$

Nilai koefisien kekasaran Chezy, dengan demikian adalah:

$$C = 18 \log\left(\frac{12R_h}{k_s}\right) = 18 \log\left(\frac{12 \times 5.197}{0.0607}\right) = 54 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$$

Dari kecepatan geser, kemiringan garis energi dapat ditemukan.

$$u_* = \sqrt{g R S_e} \Rightarrow S_e = \frac{u_*^2}{g R_h} = \frac{(0.0423)^2}{9.8 \times 5.197} = 3.5 \times 10^{-5}$$

Dengan demikian, kecepatan rata-rata aliran adalah:

$$U = C \sqrt{R_h S_e} = 54 \times \sqrt{5.197 \times 3.5 \times 10^{-5}} = 0.7283 \text{ m/s}$$

Selanjutnya, debit aliran dapat dihitung dengan mudah.

$$Q = A U = 108 \times 5.75 \times 0.7283 \approx 452 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ingat bahwa hitungan-hitungan variabel aliran di atas berangkat dari asumsi bahwa aliran secara hidraulis adalah kasar. Asumsi ini perlu dibuktikan. Pada aliran seperti ini, kekasaran dasar lebih besar daripada suatu besaran yang dikaitkan dengan tebal lapis batas laminar,  $k_s \gg 2\delta/7$ .

$$\delta = \frac{11.6 \nu}{u_*} = \frac{11.6 \times 10^{-6}}{0.0423} = 2.7 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$\Rightarrow \frac{2\delta}{7} = 7.8 \times 10^{-5} \text{ m} \ll k_s = 0.0607 \text{ m (terbukti)}$$

#### MENENTUKAN KESTABILAN BUTIR SEDIMEN DI DASAR SUNGAI

Diameter rata-rata butir sedimen dianggap sama dengan  $d_{50} = 1.5 \text{ mm}$ . Dari grafik  $S_1$ , diperoleh nilai kecepatan endap butir sedimen  $w = 0.13 \text{ m/s}$ .

$$\left. \begin{aligned} \frac{u_*}{w} &= \frac{0.0423}{0.13} = 0.325 \\ Re_* &= \frac{u_* d_{50}}{\nu} = \frac{0.0423 \times 1.5 \times 10^{-3}}{10^{-6}} = 63 \end{aligned} \right\} \text{grafik } S_4 \Rightarrow \text{transisi dekat dunes}$$

$$\left. \begin{aligned} Re_w &= \frac{w d_{50}}{\nu} = \frac{0.13 \times 1.5 \times 10^{-3}}{10^{-6}} = 195 \\ C_D &= \frac{4 g \Delta d_{50}}{3 w^2} = \frac{4}{3} \times \frac{9.8 \times 1.595 \times 1.5 \times 10^{-3}}{0.13^2} = 1.85 \\ &= 0.4 \end{aligned} \right\} \text{grafik } S_2 \Rightarrow \text{shape factor } s_f$$

$$\left. \begin{aligned} (\Psi^*)^{-1} &= \frac{u_*^2}{(s_s - 1) g d_{50}} = \frac{(0.0423)^2}{(2.595 - 1) \times 9.8 \times 1.5 \times 10^{-3}} = 0.076 \\ Re_* &= \frac{u_* d_{50}}{\nu} = \frac{0.0423 \times 1.5 \times 10^{-3}}{10^{-6}} = 63 \end{aligned} \right\} \text{Diagram Shields} \Rightarrow \text{butir sedimen bergerak}$$

#### MENGHITUNG KUANTITAS BEDLOAD DENGAN PERSAMAAN M-P&M

Persamaan transpor sediment dasar menurut Meyer-Peter and Müller adalah:

$$0.25 \rho^{1/3} \frac{(g'_{sb})^{2/3}}{(\gamma_s - \gamma) d} = \frac{\gamma R_{hb} \xi_M S_e}{(\gamma_s - \gamma) d} - 0.047$$

Dalam persamaan di atas,  $g'_{sb}$  adalah debit sedimen dalam bobot terendam, satuan [kg/s/m],  $R_{hb}$  adalah radius hidraulik dasar sungai, dan  $\xi_M$  adalah parameter kekasaran dasar sungai, dikenal pula dengan istilah *ripple factor*. Radius hidraulik dasar sungai telah dihitung,  $R_{hb} = R_h = A/P = 5.197$  m. Parameter kekasaran dasar sungai dapat dihitung berdasarkan koefisien kekasaran Chezy atau Strickler.

Koefisien kekasaran Chezy yang didasarkan pada  $d_{90}$ :

$$C_{d90} = 18 \log \frac{12R_h}{d_{90}} = 18 \log \frac{12 \times 5.197}{9 \times 10^{-3}} \approx 69 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$$

Rasio koefisien kekasaran Chezy:

$$\xi_M = \left( \frac{C}{C_{d90}} \right)^{3/2} = \left( \frac{50}{69} \right)^{3/2} = 0.69$$

Rasio koefisien kekasaran Strickler:

$$\left. \begin{aligned} K_s &= \frac{U}{R_{hb}^{2/3} S_e^{1/2}} = \frac{0.7283}{5.197^{2/3} \times (3.5 \times 10^{-5})^{1/2}} \approx 41 \text{ m}^{1/3}/\text{s} \\ K'_s &= \frac{26}{d_{90}^{1/6}} = \frac{26}{(0.009)^{1/6}} \approx 57 \text{ m}^{1/3}/\text{s} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \xi_M &= \left( \frac{K_s}{K'_s} \right)^{3/2} \\ &= \left( \frac{41}{57} \right)^{3/2} = 0.61 \end{aligned}$$

Nilai parameter kekasaran dasar  $\xi_M$  dapat mengambil salah satu nilai di atas.

Persamaan bedload M-P&M:

$$0.25 \rho^{1/3} \frac{(g'_{sb})^{2/3}}{(\gamma_s - \gamma) d_{50}} = \frac{\gamma R_{hb} \xi_M S_e}{(\gamma_s - \gamma) d_{50}} - 0.047$$

$$0.25 \rho^{1/3} (g'_{sb})^{2/3} = \rho g R_{hb} \xi_M S_e - 0.047(\rho_s - \rho) g d_{50}$$

$$\begin{aligned} 0.25 \times 1000^{1/3} \times (g'_{sb})^{2/3} &= 1000 \times 9.8 \times 5.197 \times 0.69 \times 3.5 \times 10^{-5} \\ &\quad - 0.047 \times (2595 - 1000) \times 9.8 \times 1.5 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

$$g'_{sb} = 0.0116 \text{ kg/s/m}$$

$$q_{sb} = \frac{g'_{sb}}{\gamma_s - \gamma} = \frac{g'_{sb}}{(\rho_s - \rho)g} = \frac{0.0116}{(2595 - 1000) \times 9.8} = 7.41 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s/m}$$

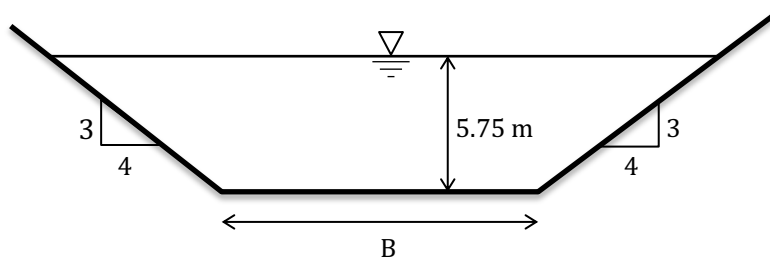
Debit sedimen untuk seluruh lebar sungai (108 m):

$$Q_{sb} = q_{sb} B = 7.41 \times 10^{-7} \times 108 = 8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} \text{ (solid)}$$

Volum timbunan material sedimen dalam setahun:

$$V_{sb} = Q_{sb} T (1 + v.r.) = 8 \times 10^{-5} \times 365 \times 24 \times 3600 \times (1 + 0.49) = 3864 \text{ m}^3 \text{ (bulk)}$$

## MENGHITUNG LEBAR DASAR SALURAN BERTAMPANG TRAPESIUM



Diketahui:  
 Kemiringan dasar saluran  
 $S_o = 6.7 \times 10^{-5}$ .  
 Koefisien kekasaran  
 Chezy  $C = 54 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ .  
 Debit aliran  $Q = 452 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Radius hidraulik:

$$R_h = \frac{A}{P} = \frac{(B + mh)h}{B + 2h\sqrt{1 + m^2}} = \frac{\left(B + \frac{4}{3} \times 5.75\right) \times 5.75}{B + 2 \times 5.75 \sqrt{1 + \left(\frac{4}{3}\right)^2}}$$

Debit aliran:

$$Q = A U = A C \sqrt{R_h S_o} \Rightarrow \frac{Q^2}{C^2 S_o} = A^2 R_h$$

$$\frac{452^2}{54^2 \times 6.7 \times 10^{-5}} = \left[\left(B + \frac{4}{3} \times 5.75\right) \times 5.75\right]^2 \times \frac{\left(B + \frac{4}{3} \times 5.75\right) \times 5.75}{B + 2 \times 5.75 \sqrt{1 + \left(\frac{4}{3}\right)^2}}$$

$$\left(\frac{452^2}{54^2 \times 6.7 \times 10^{-5}}\right) \left[B + 2 \times 5.75 \sqrt{1 + \left(\frac{4}{3}\right)^2}\right] = \left[\left(B + \frac{4}{3} \times 5.75\right) \times 5.75\right]^3$$

$$\left[\left(B + \frac{4}{3} \times 5.75\right) \times 5.75\right]^3 - \left(\frac{452^2}{54^2 \times 6.7 \times 10^{-5}}\right) \left[B + 2 \times 5.75 \sqrt{1 + \left(\frac{4}{3}\right)^2}\right] = 0$$

$$(5.75 B + 44.0833)^3 - 1045717.912 (B + 19.1667) = 0$$

Persamaan polinomial di atas diselesaikan untuk mendapatkan akar persamaannya, yaitu lebar saluran  $B$ . Dengan metode bisection (lihat kuliah Matematika Teknik), diperoleh lebar saluran  $B = 82.3463 \text{ m} \approx 82 \text{ m}$ . Hitungan dilakukan dengan bantuan program aplikasi *spreadsheet* MExcel.

## MENGHITUNG KAPASITAS TRANSPOR SEDIMEN DENGAN PERSAMAAN EINSTEIN

Kapasitas transpor sedimen (bedload) di saluran akan dihitung dengan Persamaan Einstein dan dinyatakan dalam satuan  $[\text{m}^3/\text{s}]$ . Bentuk persamaan transpor sedimen menurut Einstein, selain yang telah dikenalkan pada saat kuliah, adalah sebagai berikut:

$$\left. \begin{aligned} \Psi^* &= \frac{(s_s - 1) d_{35}}{\xi_M R_h S_e} \\ \Phi^* &= \frac{q_{sb}}{\sqrt{(s_s - 1) g d_{35}^3}} \end{aligned} \right\} \text{Grafik } \Phi^* \text{ vs } \Psi^*$$

Langkah hitungan untuk menemukan debit sediment,  $q_{sb}$ , adalah dengan menghitung parameter  $\Psi^*$ , membaca grafik untuk menemukan  $\Phi^*$ , dan menghitung  $q_{sb}$  dari  $\Phi^*$ .

Rapat massa relatif:

$$s_s = \rho_s / \rho = 2595 / 1000 = 2.595$$

Radius hidraulik saluran:

$$R_h = \frac{A}{P} = \frac{(B + mh)h}{B + 2h\sqrt{1 + m^2}} = \frac{(82 + \frac{4}{3} \times 5.75) \times 5.75}{82 + 2 \times 5.75 \sqrt{1 + (\frac{4}{3})^2}} = 5.096 \text{ m}$$

Parameter kekasaran dasar menurut Chezy:

$$\left. \begin{aligned} C &= 54 \text{ m}^{1/2}/\text{s} \\ C_{d90} &= 18 \log\left(\frac{12R_h}{d_{90}}\right) = 18 \log\left(\frac{12 \times 5.096}{0.009}\right) = 69 \text{ m}^{1/2}/\text{s} \end{aligned} \right\} \xi_M = \left(\frac{54}{69}\right)^{3/2} = 0.69$$

Kemiringan garis energi, aliran seragam:

$$S_e = S_o = 6.7 \times 10^{-5}$$

Intensitas tegangan geser  $\Psi^*$  dan intensitas transpor sedimen  $\Phi^*$ :

$$\Psi^* = \frac{(s_s - 1) d_{35}}{\xi_M R_h S_e} = \frac{(2.595 - 1) \times 1.2 \times 10^{-3}}{0.69 \times 5.096 \times 6.7 \times 10^{-5}} = 8.124 \rightarrow \text{Grafik } S_7 \Rightarrow \Phi^* = 0.13$$

Kapasitas transpor sedimen:

$$q_{sb} = \Phi^* \sqrt{(s_s - 1) g d_{35}^3} = 0.13 \times \sqrt{(2.595 - 1) \times 9.8 \times (1.2 \times 10^{-3})^3} = 2.14 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s/m}$$

Kapasitas transpor sedimen untuk seluruh lebar saluran:

$$\begin{aligned} Q_{sb} &= q_{sb} B = 2.14 \times 10^{-5} \times 82 = 1.75 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \text{ (solid)} \\ &= (1 + v.r.) \times 1.75 \times 10^{-3} = (1 + 0.49) \times 1.75 \times 10^{-3} \\ &= 2.61 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \text{ (bulk)} \end{aligned}$$

#### MENGHITUNG KAPASITAS TRANSPOR SEDIMEN DENGAN PERSAMAAN FRIJLINK

Kapasitas transpor sedimen (bedload) di saluran menurut persamaan Frijlink, dalam satuan  $[\text{m}^3/\text{s}]$ .

$$\Psi^* = \frac{(s_s - 1) d_{50}}{\xi_M R_h S_e} = \frac{(2.595 - 1) \times 1.5 \times 10^{-3}}{0.69 \times 5.096 \times 6.7 \times 10^{-5}} = 10.155$$

$$\Phi^* = \frac{q_{sb}}{d_{50} \sqrt{g \xi_M R_h S_e}} = 5 \exp(-0.27 \Psi^*)$$

$$\begin{aligned}
 q_{sb} &= 5 \exp(-0.27 \Psi^*) d_{50} \sqrt{g \xi_M R_h S_e} \\
 &= 5 \exp(-0.27 \times 10.155) \times 1.5 \times 10^{-3} \\
 &\quad \times \sqrt{9.8 \times 0.69 \times 5.096 \times 6.7 \times 10^{-5}} \\
 &= 2.3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}
 \end{aligned}$$

Intensitas transpor sedimen dapat pula dibaca dari Grafik  $S_9$ :

$$\Psi^* = 10.155 \Rightarrow \text{Grafik } S_9 \Rightarrow \Phi^* = \frac{q_{sb}}{d_{50} \sqrt{g \xi_M R_h S_e}} = 0.3$$

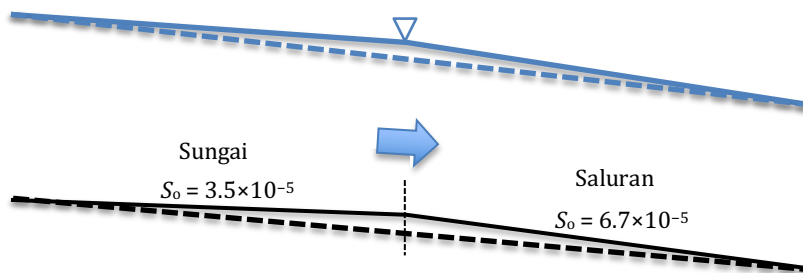
$$\begin{aligned}
 q_{sb} &= 0.3 (d_{50} \sqrt{g \xi_M R_h S_e}) = 0.3 \times 1.5 \times 10^{-3} \times \sqrt{9.8 \times 0.69 \times 5.096 \times 6.7 \times 10^{-5}} \\
 &= 2.2 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}/\text{s}
 \end{aligned}$$

Kapasitas transpor sedimen untuk seluruh lebar saluran:

$$\begin{aligned}
 Q_{sb} &= q_{sb} B = 2.3 \times 10^{-5} \times 82 = 1.89 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \text{ (solid)} \\
 &= (1 + v.r.) \times 1.89 \times 10^{-3} = (1 + 0.49) \times 1.89 \times 10^{-3} \\
 &= 2.81 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \text{ (bulk)}
 \end{aligned}$$

#### PERBANDINGAN KAPASITAS TRANSPOR SEDIMEN DI SUNGAI DAN DI SALURAN

Diketahui bahwa kapasitas transpor sedimen di sungai adalah  $8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ , sedangkan kapasitas transpor sedimen di saluran adalah  $2.61 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  (menurut Persamaan Einstein) atau  $2.61 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  (menurut Persamaan Frijlink). Karena kapasitas transpor sedimen di saluran lebih besar daripada kapasitas transpor sedimen di sungai, maka dapat disimpulkan bahwa erosi akan terjadi di saluran. Dasar saluran akan mengalami degradasi (penurunan). Degradasi ini akan menjalar ke hulu (ke sungai) dan akan berhenti setelah dicapai keseimbangan baru antara kemiringan dasar saluran dan sungai.



#### MENENTUKAN DIAMETER BATU BULAT SEBAGAI PELINDUNG DASAR SALURAN TERHADAP ANCAMAN EROSI

Batu pelindung dihamparkan di saluran untuk mencegah degradasi dasar saluran. Adanya batu ini tentu saja mengubah kekasaran dasar saluran, yang pada gilirannya mengubah parameter hidraulik aliran. Karena debit tidak berubah, maka kedalaman dan kecepatan aliran berubah. Diameter batu pelindung harus cukup besar sehingga tidak bergerak (tidak terjadi transpor sedimen). Untuk mencari diameter batu ini, dipakai grafik atau Diagram Shields. Langkah pertama adalah mengasumsikan bahwa koefisien Shields sama dengan 0.05. Dengan nilai ini, maka:

$$\left. \begin{aligned} u_{*cr}^2 &= 0.05 (s_s - 1) g d = 0.05 \times (2.595 - 1) \times 9.8 \times d = 0.7816 d \\ u_*^2 &= g R_h S_e = 9.8 \times R_h \times 6.7 \times 10^{-5} = 6.57 \times 10^{-4} R_h \end{aligned} \right\} u_*^2 = u_{*cr}^2$$

$$u_*^2 = u_{*cr}^2 \Rightarrow d = (6.57 \times 10^{-4} / 0.7816) R_h = 8.4 \times 10^{-4} R_h$$

$$U = 5.75 u_* \log\left(\frac{12R_h}{d}\right) = 5.75 \times \sqrt{6.57 \times 10^{-4} R_h} \times \log\left(\frac{12R_h}{8.4 \times 10^{-4} R_h}\right) = 0.6124 \sqrt{R_h}$$

$$Q = A U \Rightarrow 452 = 0.6124 A \sqrt{R_h}$$

$$\frac{452}{0.6124} = \left(82 + \frac{4}{3}h\right) h \sqrt{\frac{\left(82 + \frac{4}{3}h\right) h}{82 + 2h\sqrt{1 + \left(\frac{4}{3}\right)^2}}}$$

$$\left(\frac{452}{0.6124}\right)^2 = \frac{\left(82 + \frac{4}{3}h\right)^3 h^3}{82 + 2h\sqrt{1 + \left(\frac{4}{3}\right)^2}}$$

$$h^3 = \left(\frac{452}{0.6124}\right)^2 \frac{\left(82 + 2h\sqrt{1 + \left(\frac{4}{3}\right)^2}\right)}{\left(82 + \frac{4}{3}h\right)^3} \Rightarrow h = \left[\left(\frac{452}{0.6124}\right)^2 \frac{\left(82 + 2h\sqrt{1 + \left(\frac{4}{3}\right)^2}\right)}{\left(82 + \frac{4}{3}h\right)^3}\right]^{1/3}$$

Kedalaman aliran dapat diperoleh dengan metode pendekatan berurutan (lihat kuliah Matematika Teknik). Kedalaman aliran adalah  $h \approx 4.27$  m.

$$\left. \begin{aligned} A &= \left(82 + \frac{4}{3} \times 4.27\right) \times 4.27 = 374.4505 \\ P &= 82 + 2 \times 4.27 \sqrt{1 + \left(\frac{4}{3}\right)^2} = 96.2333 \end{aligned} \right\} R_h = 3.89 \text{ m}$$

$$d = 8.4 \times 10^{-4} R_h = 8.4 \times 10^{-4} \times 3.89 = 3.3 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Dengan demikian, diameter minimum batu bulat untuk melindungi dasar saluran terhadap erosi, dan dengan demikian mencegah degradasi dasar saluran, adalah 3.3 mm.

-o0o-