



Universitas Gadjah Mada
Fakultas Teknik
Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan
Program Sarjana Prodi Teknik Sipil

Teknik Sungai

Transpor Sedimen

Transpor Sedimen dan Aliran Air



S. Rokan (2008)



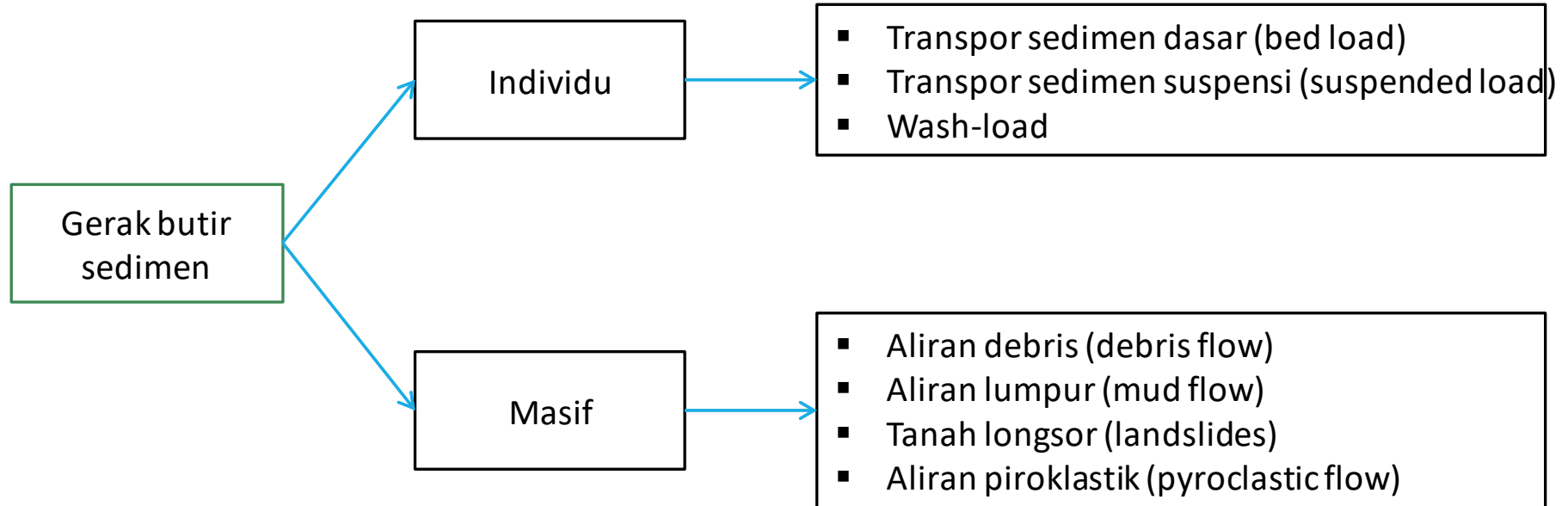
S. Progo (2010)



S. Code (2011)

2 Transpor sedimen dalam aliran air dengan berbagai kuantitas kandungan sedimen di dalam aliran air sungai

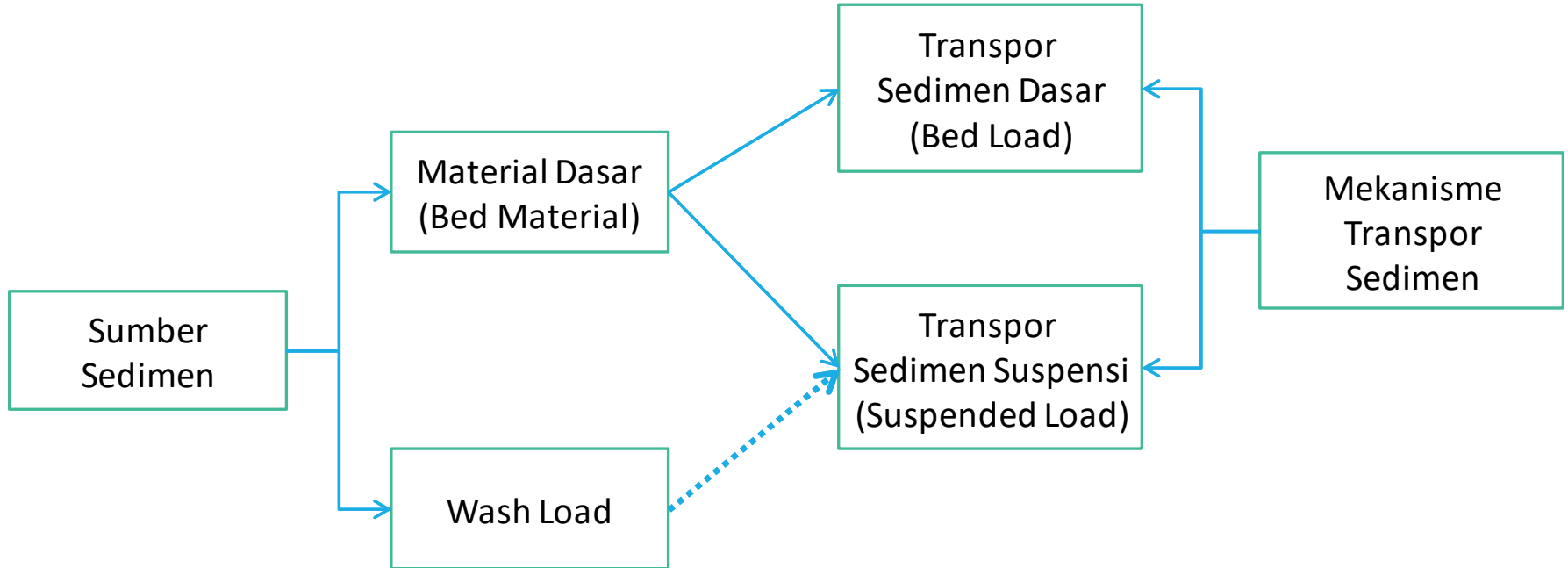
Klasifikasi Transpor Sedimen



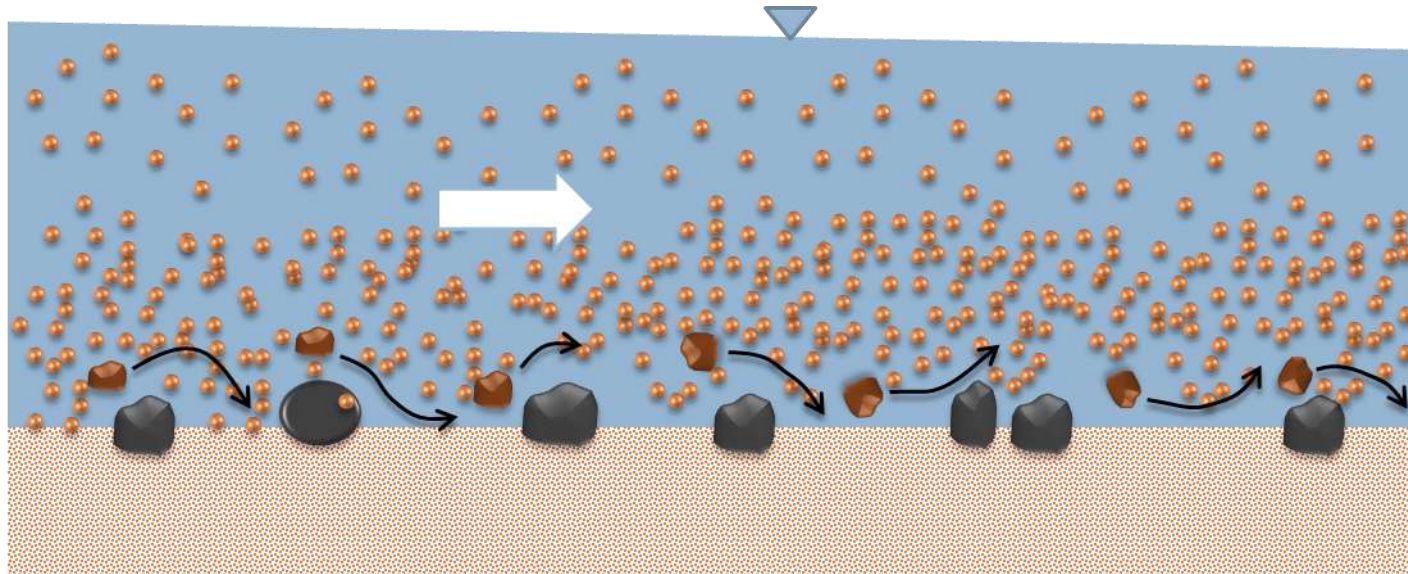
Karakteristika Transpor Sedimen

	Material	Gaya dominan
Gerak masif	Campuran air dan sedimen	Gaya gravitasi
Gerak individu	Sedimen	Gaya fluida (air)

Sumber Sedimen dan Mekanisme Transpor Sedimen



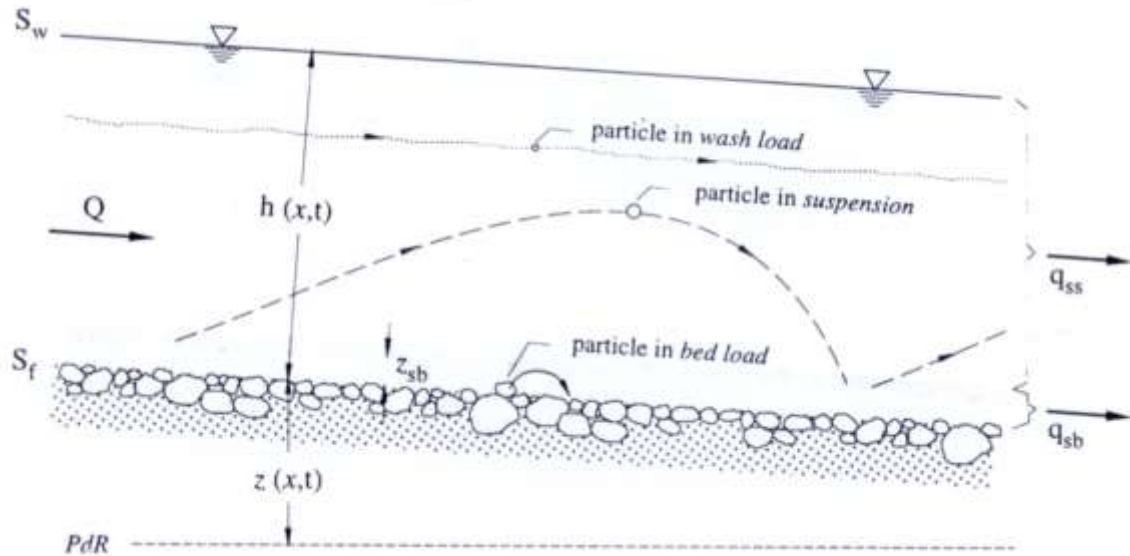
Pergerakan Sedimen di Sungai



suspensi,
terlarut

melompat,
bergeser,
menggelinding

Gerak Sedimen



Transpor Sedimen di Sungai Progo (Bendung Karangtalun)



pada musim hujan



pada musim kemarau

Gerusan Tebing Sungai



Sungai Progo di Sapon, Yogyakarta



Sungai Serayu di Maos, Cilacap

Gerusan Lokal di Sekitar Pilar Jembatan



Jembatan KA Comal, Jateng (2002)



Jembatan Trinil, Magelang (2010)

Gerusan Lokal di Sekitar Pilar Jembatan



Jembatan Kebonagung, Yogyakarta (2006)

Gerusan Lokal di Sekitar Pilar Jembatan



Jembatan Pabelan, Jateng (2011)

Gerusan Lokal di Hilir Groundsill



Groundsill Kretek, Yogyakarta (2007)

Sedimentasi, Debris Flow



Sungai Code, 2011

Transpor Sedimen di Muara Sungai Progo



13 Januari 2001



7 April 2004

Penutupan Muara Sungai oleh Sedimen



Muarareja, Tegal, 2002

Sedimen di Waduk Gajah Mungkur



pada musim hujan



pada musim kemarau

Transpor Sedimen

Awal Gerak Butir Sedimen

Konsep Awal Gerak

- Awal gerak butir sedimen sangat penting dalam kaitannya dengan studi tentang transpor sedimen, degradasi dasar sungai, desain saluran stabil, dsb.
- Dalam desain saluran stabil, salah satu metode adalah kemiringan dan dimensi saluran dibuat sedemikian hingga aliran tidak menimbulkan erosi di dasar dan tebing saluran.

Definisi Awal Gerak Butir Sedimen

- Karena pergerakan butir sedimen sangat tidak teratur, maka sangat sulit untuk mendefinisikan dengan pasti sifat atau kondisi aliran yang menyebabkan butir sedimen mulai bergerak → kondisi kritis (awal gerak butir sedimen).
- Beberapa pendekatan dalam mendefinisikan awal gerak butir sedimen (dikaitkan dengan kondisi aliran):
 - 1) sudah ada satu butir sedimen yang bergerak
 - 2) sejumlah butir sedimen sudah bergerak
 - 3) butir material dasar secara umum sudah bergerak
 - 4) terjadi pergerakan butir sedimen dan awal gerak sedimen adalah situasi saat jumlah transpor sedimen sama dengan nol.

Definisi Awal Gerak Butir Sedimen

- Pendekatan ke-1 dan ke-2 sangat subyektif, bergantung pada orang yang mengamati pergerakan butir sedimen.
- Metode ke-3 kurang tepat didefinisikan sebagai awal gerak butir sedimen karena transpor sedimen sudah terjadi di sepanjang dasar saluran.
- Metode ke-4 barangkali yang dapat dikatakan paling objektif; hanya saja, dibutuhkan pengukuran kuantitas transpor sedimen pada berbagai kondisi aliran yang berbeda untuk selanjutnya dilakukan interpolasi untuk memperoleh kondisi aliran saat kuantitas transpor sedimen sama dengan nol.

Definisi Awal Gerak Butir Sedimen

- Pendekatan teoritis (lihat berbagai literatur tentang transpor sedimen) untuk menentukan awal gerak butir sedimen didasarkan pada pendekatan:
 - kecepatan,
 - gaya angkat, dan
 - konsep gaya seret (gesek).
- Namun mengingat bahwa kondisi alami dari pergerakan butir sedimen sangat tidak teratur (random), maka pendekatan dengan teori probabilitas juga sering digunakan.

Konsep Awal Gerak Butir Sedimen

- Pendekatan kecepatan (*competent velocity*)
 - Ukuran butir material dasar sungai, d , dihubungkan dengan kecepatan di dekat dasar atau dengan kecepatan rerata yang menyebabkan pergerakan butir sedimen.
- Pendekatan gaya angkat (*lift force*)
 - Diasumsikan bahwa pada saat gaya angkat ke atas akibat aliran (*lift force*) sedikit lebih besar daripada berat butir sedimen di dalam air, maka kondisi awal gerak butir sedimen telah dicapai.
- Pendekatan tegangan geser kritis
 - Pendekatan ini didasarkan pada konsep bahwa gaya geser yang bekerja pada aliran dianggap paling berperan terhadap pergerakan butir sedimen.
- Pendekatan dengan cara lain, diantaranya dengan teori probabilitas.

Pendekatan Tegangan Geser Kritis

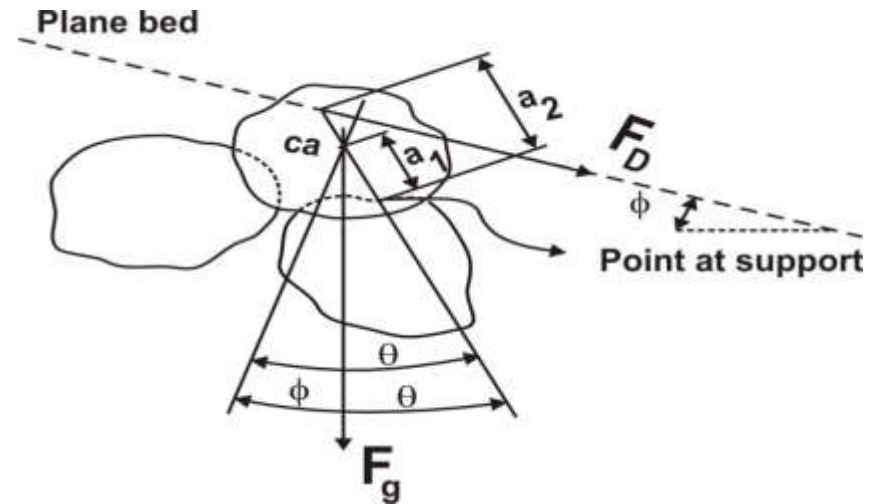
- Akibat adanya aliran air, timbul gaya-gaya aliran yang bekerja pada butir sedimen.
 - Gaya-gaya tersebut mempunyai kecenderungan untuk menggerakkan/menyeret butir sedimen.
 - Pada butir sedimen kasar (pasir dan batuan), gaya untuk melawan gaya-gaya aliran tsb merupakan fungsi berat butir sedimen.
 - Pada butir sedimen halus yang mengandung fraksi lanau (*silt*) atau lempung (*clay*) yang cenderung bersifat kohesif, gaya untuk melawan gaya-gaya aliran lebih disebabkan oleh gaya kohesi daripada berat butir sedimen.
 - Kohesi butir sedimen halus merupakan fenomena yang kompleks; pengaruh kohesi bervariasi dan bergantung kandungan mineral.
- Pada kuliah ini, yang dibahas adalah **Sedimen Non-kohesif**

Pendekatan Tegangan Geser Kritis

- Pada waktu gaya-gaya aliran (gaya hidrodinamik) yang bekerja pada butir sedimen mencapai suatu nilai tertentu, yaitu apabila gaya sedikit ditambah maka akan menyebabkan butir sedimen bergerak, maka kondisi ini dinamakan sebagai **kondisi kritis**.
- Parameter aliran pada kondisi kritis (tegangan geser dasar, τ_o , dan kecepatan aliran, U , mencapai nilai kritis awal gerak sedimen).
 - Bila gaya-gaya aliran berada di bawah nilai kritisnya, maka butir sedimen tidak bergerak; dasar saluran dikatakan sebagai *rigid bed*.
 - Bila gaya aliran melebihi nilai kritisnya, butir sedimen bergerak; dasar saluran dikatakan sebagai dasar bergerak (*movable bed, erodible bed*).

Awal Gerak Butir Sedimen Non-kohesif

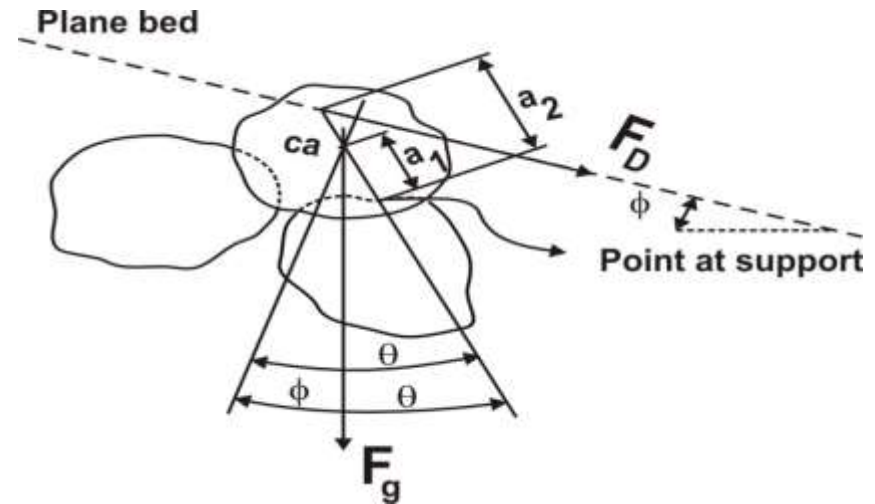
- Gaya-gaya yang bekerja pada suatu butiran sedimen non-kohesif dalam aliran air
 - Gaya berat (*gravity force*)
 - Gaya apung (*buoyancy force*)
 - Gaya angkat (*hydrodynamic lift force*)
 - Gaya seret (*hydrodynamic drag force*)



Awal Gerak Butir Sedimen Non-kohesif

■ Gaya-gaya yang bekerja pada suatu butiran sedimen non-kohesif dalam aliran air

- F_D : gaya seret
- F_g : gaya berat di dalam air
- ϕ : sudut kemiringan dasar
- θ : sudut gesek (longsor) alam (*angle of repose*)
- a_1 : jarak antara pusat berat (CG) sampai titik guling (*point of support*)
- a_2 : jarak antara pusat gaya seret (*drag*) sampai titik guling



Awal Gerak Butir Sedimen Non-koheusif

- Pada kondisi kritis, butir sedimen hampir bergerak mengguling terhadap titik guling (*point of support*).
 - Gaya berat (*gravity force*) di dalam air

$$F_G = C_1 (\gamma_s - \gamma) d_s^3$$

$C_1 d_s^3$: volume butir sedimen

d_s : diameter signifikan butir sedimen (biasanya ukuran ayakan)

C_1 : konstanta untuk konversi volume butir sedimen

- Gaya seret (*drag force*)

$$F_D = C_2 \tau_c d_s^2$$

$C_2 d_s^2$: luas permukaan efektif butir sedimen yang mengalami tegangan geser kritis, τ_c

luas efektif adalah luas proyeksi butir pada bidang yang tegak lurus arah aliran

Awal Gerak Butir Sedimen Non-kohesif

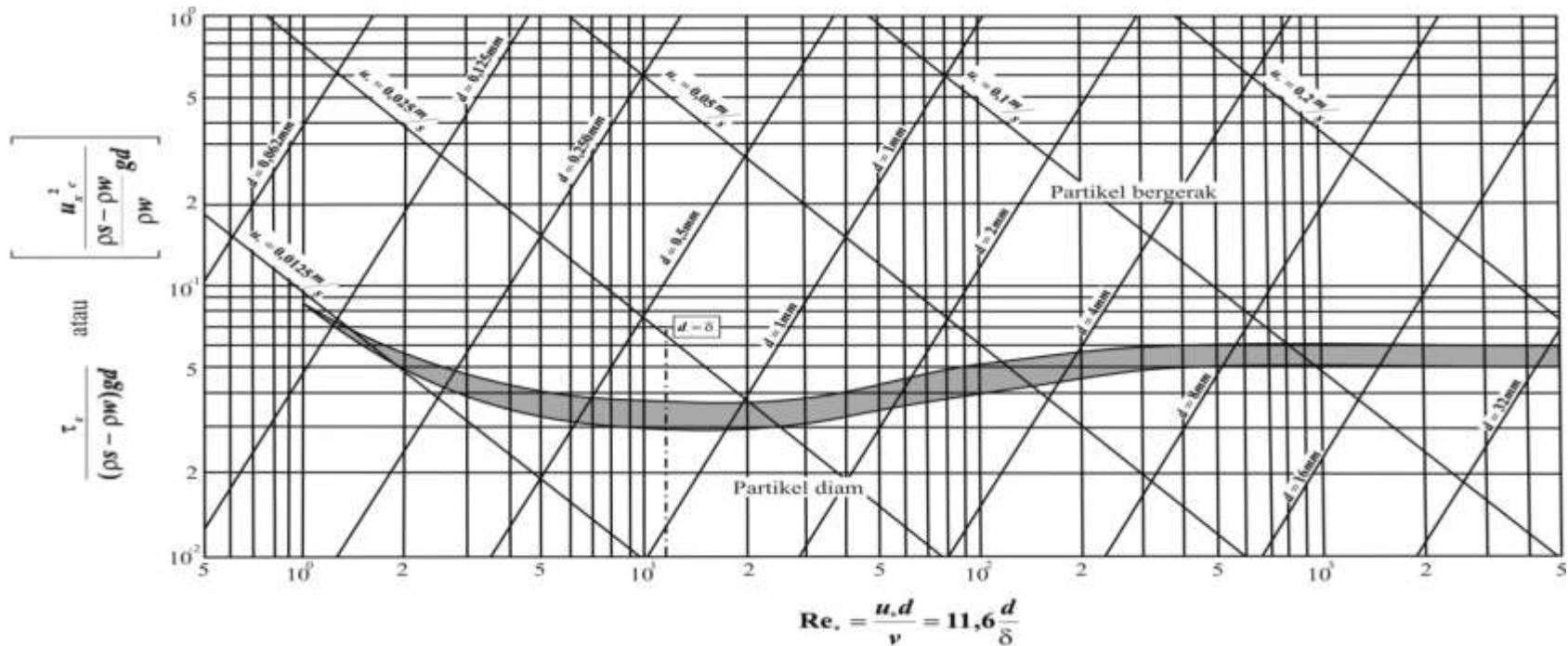
- Pada saat dicapai kondisi kritis

momen gaya berat butir sedimen = momen gaya seret

jarak $\square F_G = F_D \square$ jarak

$$\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) d_s} = \frac{\rho u_{*c}^2}{\gamma'_s d_s} = f \left(\frac{u_{*c}^2 d_s}{\nu} \right) = f(\text{Re}_*)$$

Diagram Shields



Contoh Hitungan

- Diketahui suatu saluran dengan karakteristik sbb.
 - kedalaman aliran $h = 3 \text{ m}$
 - kemiringan dasar saluran, $S_o = 10^{-4}$
 - butir material dasar seragam $d = 2 \text{ mm}$ dan rapat massa $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$
 - air $T = 12^\circ\text{C}$, $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$
- Hitunglah
 - kestabilan butir material dasar
 - kestabilan butir dengan berdasarkan nilai-nilai tegangan geser di dasar, tegangan geser kritis, kecepatan geser kritis, Angka Reynold butir sedimen kritis
 - $\rho_s = 3000 \text{ kg/m}^3$ dan $T = 20^\circ\text{C}$, ρ_w konstan, berapakah τ_c dan Re_{*c}

❑ Kestabilan butir material dasar

$$T_{\text{air}} = 12^{\circ}\text{C} \rightarrow \nu_{\text{air}} = 1.25 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3 \rightarrow$ Seluruh bagian Diagram Shields berlaku

$$u_* = \sqrt{ghS_o} = \sqrt{9.81 \times 3 \times 10^{-4}} = 0.0542 \text{ m/s}$$

$$d = 2 \text{ mm}$$



Diagram Shields  1

butir sedimen bergerak (tidak stabil)

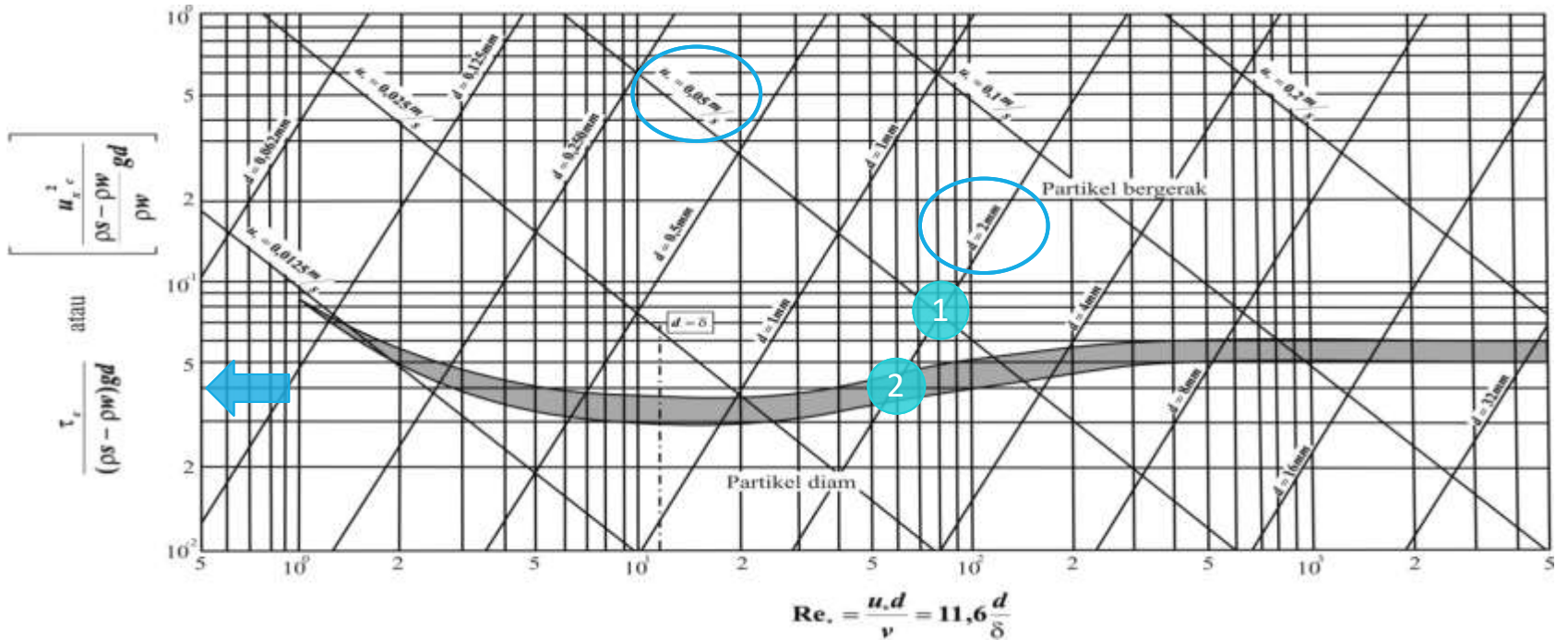
❑ Kestabilan butir material dasar berdasarkan tegangan geser

$$d = 2 \text{ mm} \rightarrow \text{dari Diagram Shields diperoleh: } \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho)gd} = 0.04 \quad \text{img alt="blue arrow" data-bbox="770 595 815 640"/> 2$$

$$\tau_c = 0.04 \times (2650 - 1000) \times 9.81 \times 0.002 = 1.294 \text{ N/m}^2 \quad \text{img alt="checkbox" data-bbox="655 725 675 745"/> $\tau_o > \tau_c$$$

$$\tau_o = \rho ghS_o = 1000 \times 9.81 \times 3 \times 0.0004 = 2.94 \text{ N/m}^2 \quad \text{img alt="checkbox" data-bbox="655 830 675 850"/> butir sedimen bergerak$$

Diagram Shields



- Kestabilan butir material dasar berdasarkan kecepatan gesek (*friction velocity*)

$$\frac{(u_{*c})^2}{\Delta g d} = 0.04; \quad \Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} = \frac{2650 - 1000}{1000} = 1.65$$

$$u_{*c} = \sqrt{0.04 \times 1.65 \times 9.81 \times 0.002} = 0.036 \text{ m/s}$$

Dari data aliran, telah dihitung:

$$u_* = \sqrt{g h S_o} = \sqrt{9.81 \times 3 \times 10^{-4}} = 0.0542 \text{ m/s}$$

} $u_* > u_{*c}$ □ butir sedimen bergerak

$$\text{Re}_{*c} = \frac{u_* d}{\nu} = \frac{0.036 \times 0.002}{1.25 \times 10^{-6}} = 57.6$$

□ Tegangan geser kritis dan Angka Reynolds

$$\rho_s = 3000 \text{ kg/m}^3$$

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

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

$$d = 2 \text{ mm} \quad \square \quad \text{Diagram Shields: } \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho_w)gd} = 0.04 \quad \rightarrow \quad 2$$

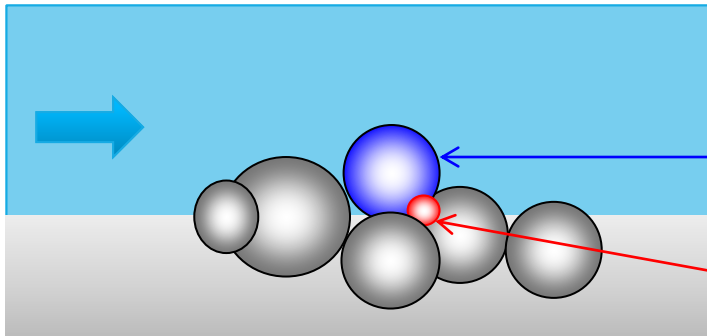
$$\tau_c = 0.04 \square (3000 - 1000) \square 9.81 \square 0.002 = 1.57 \text{ N/m}^2$$

$$u_{*c} = \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho_w}} = \sqrt{\frac{1.57}{1000}} = 0.0396$$

$$\text{Re}_{*c} = \frac{u_{*c} d}{\nu} = \frac{0.0396 \square 0.002}{10^{-6}} = 79.2$$

Gradasi Butir Sedimen Beragam

- Material dasar terdiri dari campuran berbagai ukuran butir sedimen



- butir besar terpapar dan bergerak karena pengaruh kecepatan aliran
- butir kecil terlindungi (terkunci) oleh butir berukuran besar

Gradasi Butir Sedimen Beragam

- Persamaan Egiazaroff (1965)

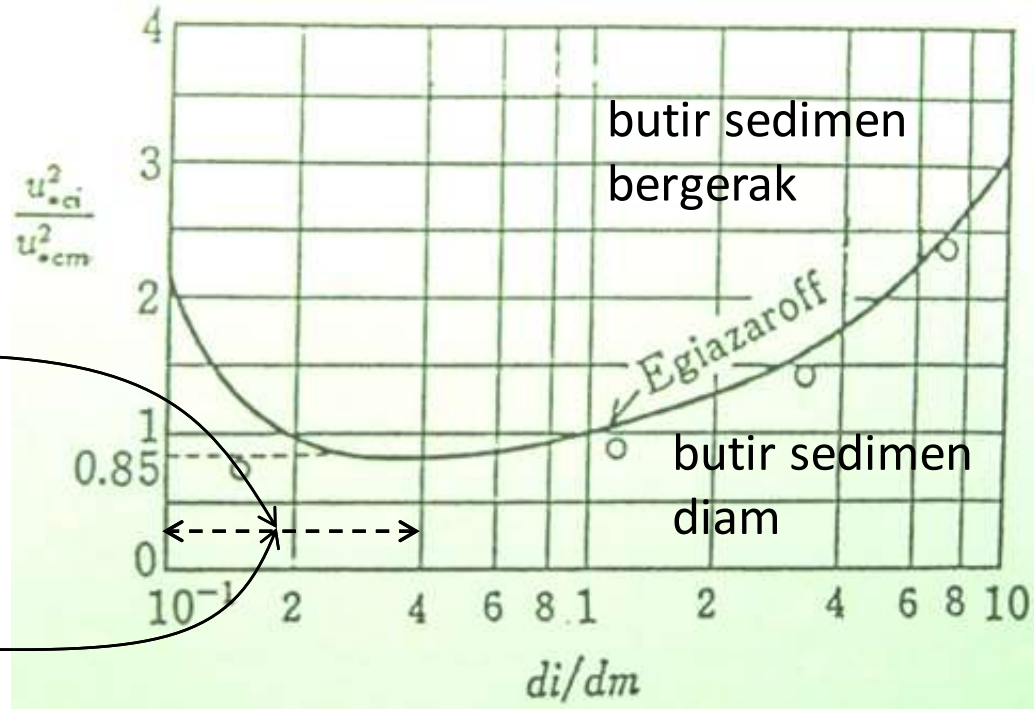
$$\frac{u_{*ci}^2}{u_{*cm}^2} = \frac{1.64}{\log \frac{19d_i^2}{d_m^2}} \frac{d_i}{d_m} \quad \text{dan} \quad \frac{(u_{*cm})^2}{\frac{\sigma}{\rho} - 1 g d_m} = 0.05 \quad \frac{(u_{*cm})^2}{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d_m} = 0.05$$

u_{*ci} : kecepatan geser kritis untuk butir sedimen berdiameter d_i
 u_{*cm} : kecepatan geser kritis untuk butir sedimen berdiameter d_m

- Persamaan Ashida and Michiue (1971)

$$\frac{(u_{*ci})^2}{(u_{*cm})^2} = 0.85 \quad (d_i \leq 0.4d_m)$$

Gradasi Butir Sedimen Beragam

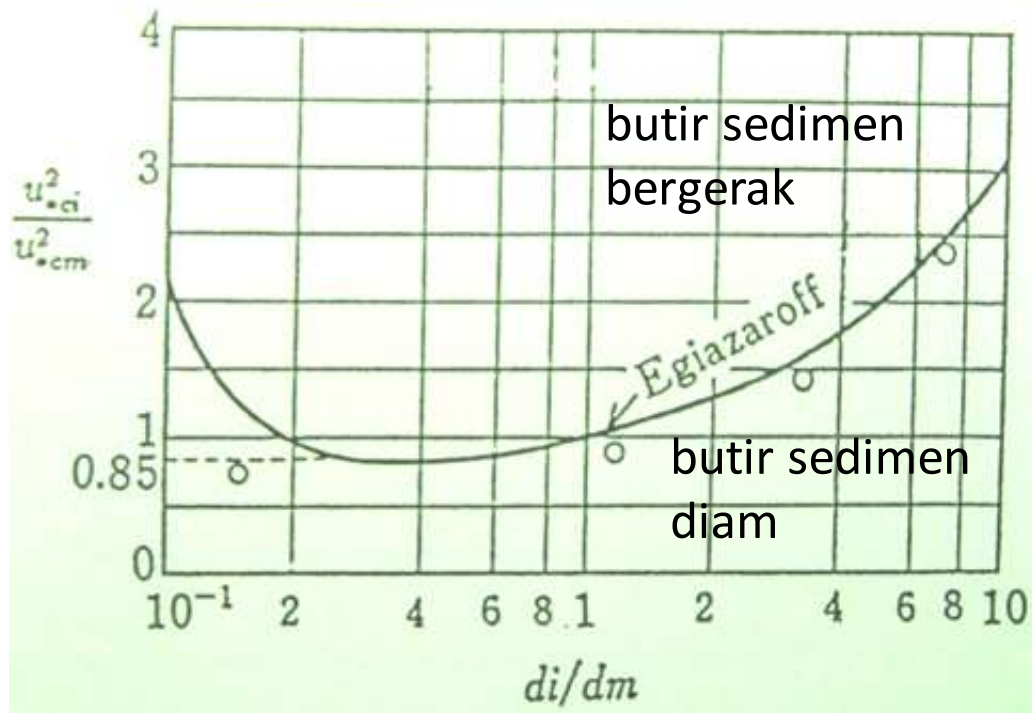


di kisaran ini, Persamaan Egiazaroff overestimates

di kisaran ini, dipakai Persamaan Ashida and Michiue

Gradasi Butir Sedimen Beragam

Jika butir sedimen berdiameter $d_i = d_m$ tidak bergerak, maka butir sedimen berdiameter $d_i < d_m$ tidak dapat bergerak \rightarrow efek *sheltering*.

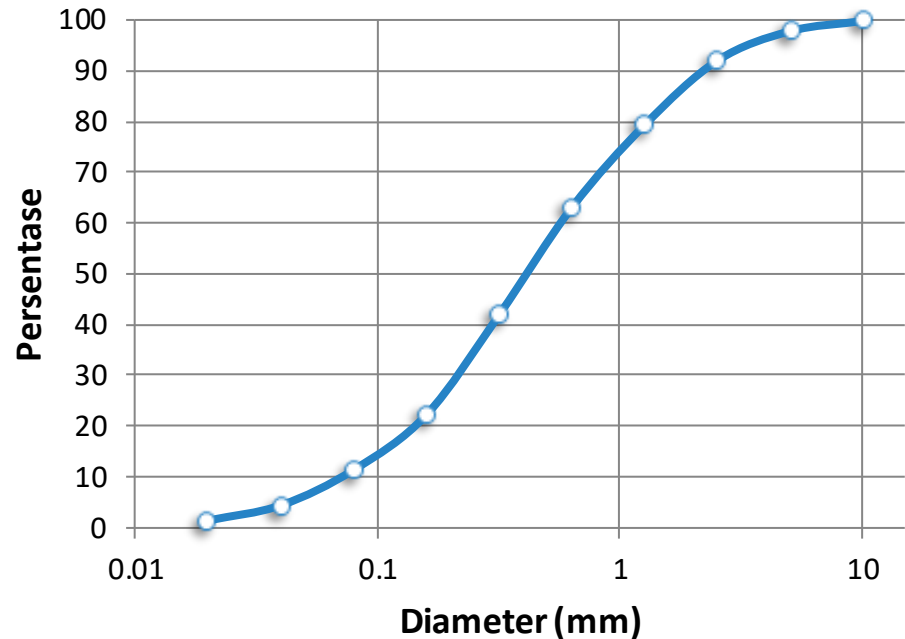


Contoh Hitungan

- Diketahui
 - gradasi butir material dasar sungai (tabel pada slide berikutnya)
 - *specific gravity* butir sedimen 2.65
 - kedalaman aliran 1.5 m
 - kemiringan garis energi 1/1600
- Cari ukuran butir sedimen yang bergerak
 - asumsi tegangan geser kritis: $\tau_{*cm} = 0.05$

Gradasi Ukuran Butir Sedimen

Diameter (mm)	Persentase
0.01 – 0.02	1.3
0.02 – 0.04	3.0
0.04 – 0.08	7.0
0.08 – 0.16	10.9
0.16 – 0.32	19.8
0.32 – 0.64	21.2
0.64 – 1.28	16.3
1.28 – 2.56	12.7
2.56 – 5.12	5.8
5.12 – 10.24	2.0
Σ	100.0



Diameter (cm)	Persentase	Dia. representatif d_i (cm)	d_i / d_m	$(u_{*ci} / u_{*cm})^2$	u_{*ci} (cm/s)	$u_{*ci,uniform}$ (cm/s)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
0.01 – 0.02	1.3	0.01	0.0164	0.85	7.81	1.12
0.02 – 0.04	3.0	0.03	0.0328	0.85	7.81	1.29
0.04 – 0.08	7.0	0.06	0.0655	0.85	7.81	1.71
0.08 – 0.16	10.9	0.11	0.1311	0.85	7.81	2.34
0.16 – 0.32	19.8	0.23	0.2621	0.85	7.81	3.87
0.32 – 0.64	21.2	0.45	0.5243	0.86	7.87	5.77
0.64 – 1.28	16.3	0.91	1.0485	1.02	8.55	8.56
1.28 – 2.56	12.7	1.81	2.0971	1.34	9.82	12.10
2.56 – 5.12	5.8	3.62	4.1941	1.90	11.68	17.12
5.12 – 10.24	2.0	7.24	8.3719	2.83	14.26	24.18

Kolom 3	diameter representatif, $d_i = \sqrt{d_{il} \cdot d_{iu}}$
Kolom 4	d_i/d_m ; $d_m = (f_i \cdot d_i) = 0.86 \text{ cm}$
Kolom 5	$\frac{u_{*ci}^2}{u_{*cm}^2} = 0.85 \text{ untuk } d_i \leq 0.4 d_m, \frac{u_{*ci}^2}{u_{*cm}^2} = \frac{1.64}{(\log 19 d_i/d_m)^2} \frac{d_i}{d_m}$ $\tau_{*cm} = \frac{(u_{*cm})^2}{(\sigma/\rho - 1)gd_m} = 0.05 \quad u_{*cm} = 8.47 \text{ m/s}$
Kolom 6	cukup jelas
Kolom 7	Diagram Shields

Transpor Sedimen

Bed load

Transpor Sedimen

- Persamaan transpor sedimen yang ada di HEC-RAS
 - Ackers and White (total load)
 - Engelund and Hansen
 - Laursen (total load)
 - Meyer-Peter and Müller
 - Toffaleti
 - Yang
- Beberapa persamaan transpor sedimen yang juga lazim dijumpai
 - Einstein
 - Frijlink
 - Graf and Acaroglu (total load)

Transpor Sedimen Dasar (*Bed Load Transport*)

- Kasus yang dibahas
 - Sungai (saluran) yang memiliki dasar rata dan terdiri dari material padat yang dapat bergerak, bersifat non-kohefif, serta berdiameter seragam
 - Butir sedimen tersebut bergerak akibat gaya yang ditimbulkan oleh aliran seragam dan permanen
- Kasus di atas adalah penyederhanaan dari kasus sesungguhnya yang dijumpai di lapangan
 - Dasar sungai tidak rata, memiliki konfigurasi (bentuk) dasar bergelombang (ripples, dunes, anti-dunes)
 - Material dasar sungai terdiri dari butir sedimen berbagai ukuran (tak-seragam) dan mungkin saja bersifat kohefif

Transpor Sedimen Dasar (*Bed Load Transport*)

□ Transpor sedimen

$$\Phi = \frac{q_{sb}}{\sqrt{(s_s - 1) g d^3}}$$

q_{sb} → debit sedimen (bed load) per satuan lebar sungai, $m^3/s/m$
 kadang pula dituliskan dalam satuan, m^2/s

s_s → rapat masa relatif, $s_s = \rho_s / \rho$

g → percepatan gravitasi, m/s^2

d → diameter butir sedimen, m

Φ → intensitas (debit) transpor sedimen dasar, tak berdimensi

Ingat diameter butir sedimen, d , lazim dinyatakan dalam satuan milimeter → perlu diubah dulu menjadi meter.

Transpor Sedimen Dasar (*Bed Load Transport*)

- Transpor sedimen

$$\Phi = f(\tau_*) \Leftrightarrow \frac{q_{sb}}{\sqrt{(s_s - 1)gd^3}} = f\left(\frac{\tau_b}{(\gamma_s - \gamma)d}\right)$$

Persamaan di atas sering dituliskan sbb.:

$$\Phi = f(\Psi) \quad \rightarrow \quad \tau_* \propto \Psi^{-1}$$

Ψ dikenal sebagai intensitas tegangan geser, tak berdimensi

↳ intensitas transpor sedimen merupakan fungsi intensitas tegangan geser

Transpor Sedimen Dasar (*Bed Load Transport*)

□ Transpor sedimen

$\Phi = f(\tau_*)$ ■ sering kali dinyatakan dalam bentuk *power law*: $\Phi = \alpha (\tau_*)^\beta$

■ karena $\frac{U}{\sqrt{\tau_b/\rho}} = \sqrt{\frac{8}{f}}$

■ maka $U^2 \propto \tau_b \propto \tau_*$

■ oleh karena itu, persamaan ini dapat didekati dengan:

$$q_{sb} = \alpha_s U^{b_s} \leftarrow \alpha_s = \alpha, b_s = 2\beta$$

Schoklitsch (1934, 1950)

$$q_{sb} = \frac{2.5}{s_s} s_e^{3/2} (q - q_{cr})$$

$[m^3/s/m]$ debit (air) kritis $\rightarrow q_{cr} = 0.26 (s_s - 1)^{5/3} \frac{d^{3/2}}{s_e^{7/6}}$

- Persamaan Schoklitsch berlaku untuk
 - diameter butir $d > 6$ mm
 - butir seragam
 - untuk butir tak-seragam, $d = d_{40}$
 - kemiringan dasar sungai sedang sampai curam

Meyer-Peter and Müller (1934, 1948)

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

$$g'_{sb} = \frac{g_{sb} (\gamma_s - \gamma)}{\gamma_s} \quad \text{dan} \quad \frac{g_{sb}}{\gamma_s} = q_{sb}$$

$m^3/s/m$

- debit sedimen dinyatakan dalam bobot terendam, kg/s/m
- R_{hb} adalah radius hidraulik dasar sungai
- $d = d_{50}$ untuk butir tak-seragam



$$\Phi = 8 (\xi_M \tau_* - \tau_{*cr})^{3/2}$$

$$\xi_M = \frac{K_S^{3/2}}{K'_S}$$

parameter kekasaran dasar

$$K_S = \frac{U}{R_{hb}^{2/3} S_e^{1/2}}$$

$k_{Strickler}$ total

$$K'_S = \frac{26}{d_{90}^{1/6}}$$

$k_{Strickler}$ butir sed.

Meyer-Peter and Müller (1934, 1948)

- Persamaan M-P&M dapat pula dituliskan dalam bentuk sbb.

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

$$\xi_M = \frac{C}{C_{d90}} \left(\frac{U}{U_{*c}} \right)^{3/2}$$



parameter
kekasaran dasar

$$C = \frac{U}{R_{hb}^{1/2} S_e^{1/2}}$$



C_{Chezy}

$$C_{d90} = 18 \log \left(\frac{12 R_h}{d_{90}} \right)$$



C_{Chezy} butir sed.

$$g'_{sb} = \frac{g_{sb} (\gamma_s - \gamma)}{\gamma_s}$$



[kg/s/m]

$$\frac{g_{sb}}{\gamma_s} = q_{sb}$$



[m³/s/m]

Meyer-Peter and Müller (1934, 1948)

- Persamaan M-P&M
 - diameter butir $d > 2$ mm
 - butir seragam maupun tak-seragam
 - kemiringan dasar sungai sedang sampai curam
 - apabila dasar sungai rata, tanpa *bed-form*, $\xi_M = 1$
 - apabila dasar sungai tidak rata, ada *bed-form*, $0.35 < \xi_M < 1$

Einstein (1950)

$$\Psi^* = \zeta_H \zeta_P \left(\beta^2 / \beta_\chi^2 \right) \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \frac{d}{R'_{hb} S_e}$$

↓
intensitas aliran

$$\beta = \log(10.6)$$

$$\beta_\chi = \log(10.6 X / \Delta)$$

$$X = \begin{cases} 0.77 \Delta & \Delta / \delta > 1.8 \\ 1.39 \delta & \Delta / \delta < 1.8 \end{cases}$$

$$\Delta = f(k_s / \delta) \Rightarrow \Delta = k_s / \chi$$

$$\delta = 11.5 \nu / u'_*$$



radius hidraulik butir sedimen

$$R'_{hb} = \xi_M R_h$$



vs

$$\Phi^* = \frac{q_{sb}}{\sqrt{(s_s - 1) g d^3}} \quad [m^3/s/m]$$



intensitas transpor sedimen

ζ_H
 ζ_P

} Grafik

$$d = d_{35}$$

Jika butir sedimen seragam

$$\zeta_H = 1, \zeta_P = 1, \left(\beta^2 / \beta_\chi^2 \right) = 1$$

➔ Grafik

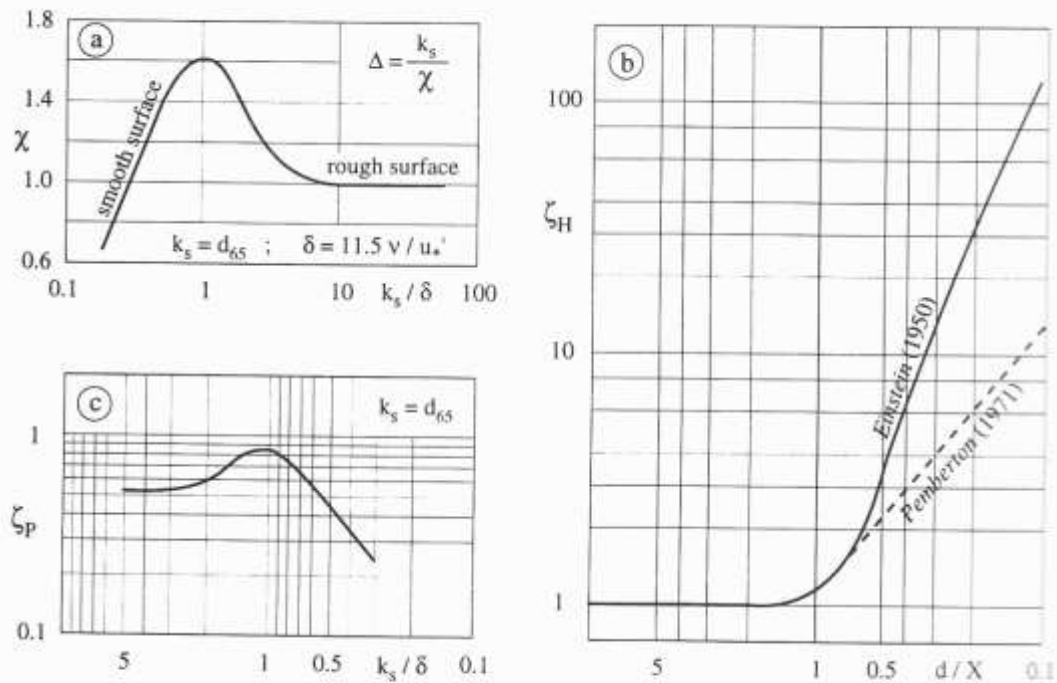


Fig. 6.7 Correction coefficients : (a) of velocity distribution, (b) of hiding and (c) of lift force (see Graf, 1971, p. 146).

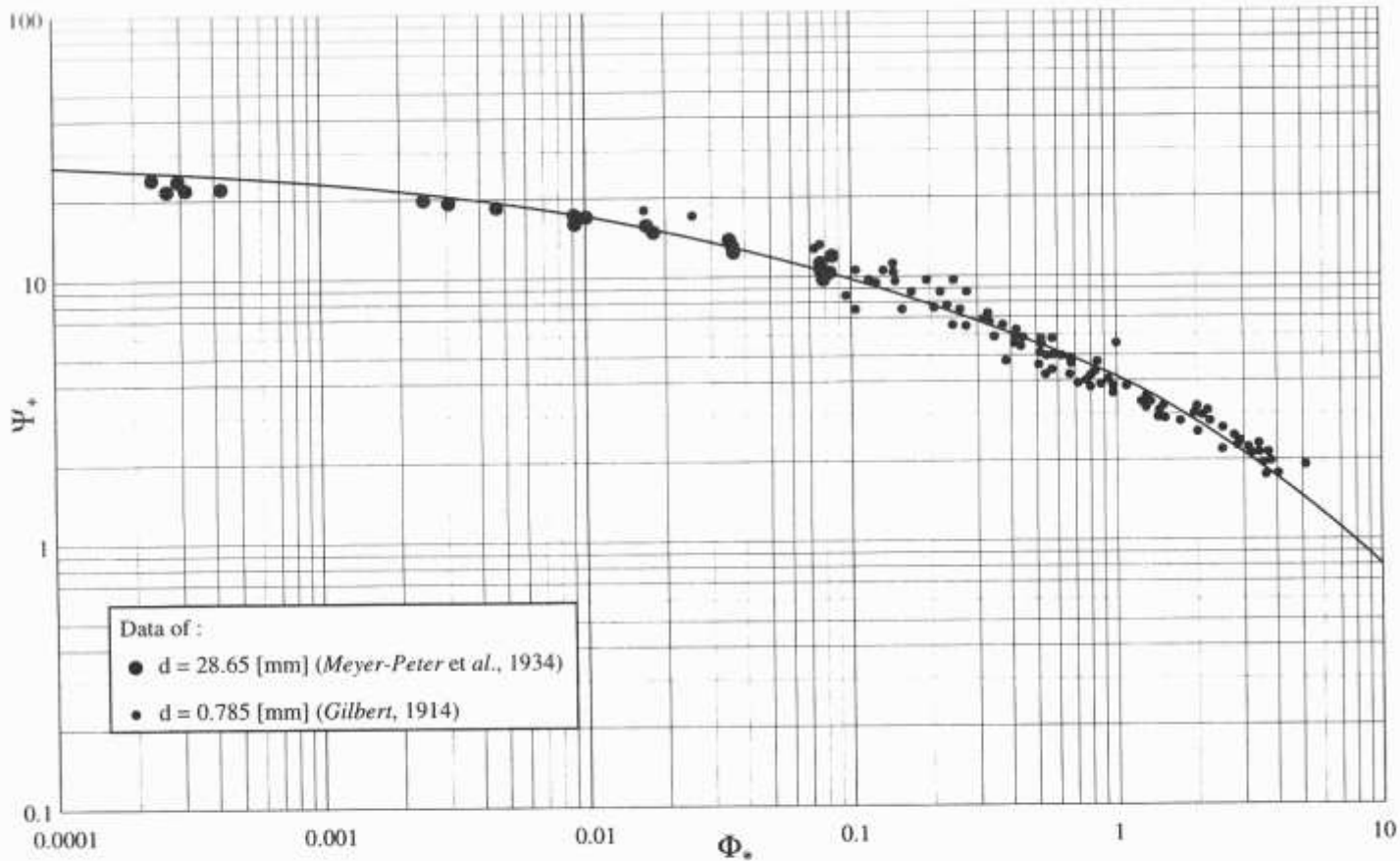


Fig. 6.8 Equation of bed load, $\Phi_* = f(\Psi_*)$, of Einstein (see *Graf*, 1971, p. 148).

Engelund and Hansen

$$q_{sb} = 0.05 \gamma_s U^2 \sqrt{\frac{d}{g \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1} \frac{\tau_b}{(\gamma_s - \gamma) d}}^{3/2}$$

↓

[m³/s/m]


$$d = d_{50}$$

$$\tau_b = \rho g R_h S_e$$

$$q_{sb} = 0.05 \rho_s g U^2 \sqrt{\frac{d}{(s_s - 1) g} \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho) g d}}^{3/2}$$

Frijlink (1952)

$$\frac{q_{sb}}{d_m \sqrt{g \mu R_h S_e}} = 5 \exp \left[-0.27 \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \frac{d_m}{\mu R_h S_e} \right]$$

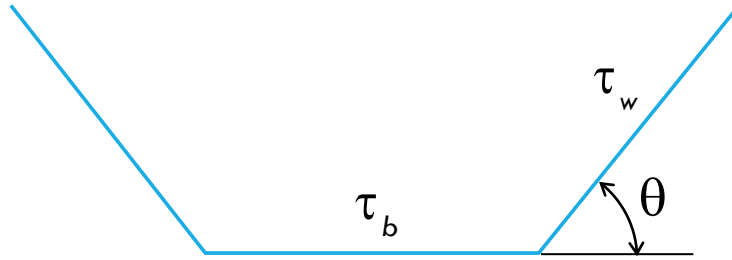


← $\Phi^* = f(\Psi^*)$ Grafik

$$\mu = \xi_M = \frac{C}{C_{d90}} = \frac{18 \log \left[\frac{1}{k_s} \frac{2R_h}{d_{90}} \right]^{3/2}}{18 \log \left[\frac{1}{k_s} \frac{2R_h}{d_{90}} \right]}$$

- ┌ adalah *ripple factor*
- C adalah koefisien kekasaran dasar Chezy sesungguhnya (butir sedimen + bentuk dasar sungai)
- C_{d90} adalah koefisien kekasaran dasar Chezy menurut butir sedimen saja (d_{90})

Tegangan Geser di Tebing Sungai



Tegangan geser pada awal gerak butir sedimen

$$\frac{\tau_w}{\tau_b} = \cos \theta \left[1 - \frac{\tan^2 \theta}{\tan^2 \phi} \right]$$

ϕ internal angle of repose

Kecepatan Jatuh Butir Sedimen

$$Re = \frac{wd}{\nu} < 1 \quad \rightarrow \quad w = \frac{1}{18} \frac{\rho_s - \rho}{\mu} g d^2 \quad \rightarrow \quad C_D = \frac{24}{Re}$$

$$Re = \frac{wd}{\nu} > 1 \quad \rightarrow \quad w = \frac{4}{3} \frac{g d}{C_D} \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \quad \rightarrow \quad C_D \rightarrow \text{Grafik S-2}$$

Grafik S-1 \rightarrow kecepatan jatuh vs diameter butir sedimen
 butir berbentuk bola dengan berbagai nilai temperatur air
 butir sembarang, menurut Rubey (garis strip)

Konfigurasi Dasar Sungai

- Debit (kecepatan) aliran bertambah, maka dasar sungai berubah
 - Plain bed (dasar rata)
 - bed-load terjadi, sebagian butir halus loncat dan menjadi suspensi
 - Ripples
 - dasar bergelombang, teratur, amplitudo \ll panjang gelombang \rightarrow gundukan kecil
 - Dunes
 - dasar seperti gelombang, memanjang ke arah hilir (sisi hulu lebih landai), erosi di sisi hilir
 - dunes lama-lama menyatu membentuk “Bars” \rightarrow dasar rata
 - Sheet flow
 - dasar rata, daya angkut besar, terjadi pada $Fr \sim 1$, $k \sim d$
 - Anti-dunes
 - endapan pada sisi hilir dunes, erosi di sisi hulu dunes, bentuk gelombang dasar sungai relatif simetris, gelombang dasar ini bergerak ke arah hilir, terjadi pada $Fr > 1$
- Grafik S-4

Transpor Sedimen

Transpor Sedimen Total

Graf *et al.* (1968, 1987, 1995)

$$\Psi_A = \frac{(s_s - 1)d}{S_e R_h}$$

$$\Phi_A = \frac{C_s UR_h}{\sqrt{(s_s - 1)gd^3}} = \frac{(q_s/q)UR_h}{\sqrt{(s_s - 1)gd^3}}$$

$$d = d_{50}$$

$$\Phi_A = 10.39 (\Psi_A)^{-2.52} \quad \text{untuk} \quad 10^{-2} < \Phi_A < 10^3 \quad \text{atau} \quad \Psi_A \leq 14.6$$

$$\Phi_A = 10.4 K (\Psi_A)^{-1.5} \quad \leftarrow \quad K = \begin{cases} \square & \Psi_A^{-1} \\ \square & \\ \square & \\ \square & (1 - 0.045 \Psi_A)^{2.5} \\ \square & \\ \square & 0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{untuk} \quad \Psi_A \leq 14.6 \\ 14.6 < \Psi_A \leq 22.2 \\ \Psi_A > 22.2 \end{array}$$

Ackers and White (1973)

$$F_{gr} = \frac{u_*^{n_w}}{\sqrt{(s_s - 1)gd}} \frac{U}{\sqrt{32 \log(10h_m/d)}}^{(1-n_w)}$$

$$G_{gr} = C_w \frac{F_{gr}}{A_w} - 1$$

$$C_s = \frac{q_s}{q} = G_{gr} \frac{d}{h_m} \frac{U}{u_*}^{n_w}$$

C_s : konsentrasi rata-rata tampang

h_m : kedalaman rata-rata, A/B

Ackers and White (1973)

koefisien	$d_* > 60$ $d > 2.5 \text{ mm}$	$1 < d_* \leq 60$	$d_* \leq 1$ $d \leq 0.04 \text{ mm}$
n_w	0	$(1 - 0.56 \log d_*)$	1
m_w	1.5	$(9.66/d_*) + 1.34$	
A_w	0.17	$(0.23/d_*^{0.5}) + 0.14$	
C_w	0.025	$\log C_w = 2.86 \log d_* - (\log d_*)^2 - 3.53$	

$$d_* = d \left(s_s - 1 \right) \frac{g}{v^2}^{1/3}$$

Persamaan Transpor Sedimen

Formula	d [mm]	S_f	d_x [mm]
Schoklitsch	0.3 – 7.0 (44.0)	0.003 – 0.1	d_{40}
Meyer-Peter <i>et al.</i>	3.1 – 28.6	0.0004 – 0.02	d_m (d_{50})
Einstein	0.8 – 28.6	-	d_{35}
Grafand Acaroglu	0.3 – 1.7 (23.5)	-	d_{50}
Ackers and White	0.04 – 4.0	$Fr < 0.8$	d_{35}

d_x : diameter ekuivalen, untuk butir sedimen tak-seragam

Contoh

- Sebuah sungai lurus, tampang trapesium
 - lebar dasar, $B = 55$ m
 - kemiringan talud $V:H = 3:5$
 - kemiringan dasar sungai $S_o = 0.00013$
 - kedalaman aliran normal $h = 1.5$ m
 - kecepatan aliran di permukaan $V = 0.7$ m/s
 - material dasar sungai terdiri dari pasir:
 - $d_{35} = 0.6$ mm, $d_{50} = 0.9$ mm, $d_{65} = 1.2$ mm, $d_{90} = 2$ mm
 - rapat massa, $\rho_s = 2670$ kg/m³
 - rapat massa air, $\rho = 1000$ kg/m³
 - temperatur air 20°C
 - percepatan gravitasi, $g = 9.8$ m/s²
- Hitunglah
 - debit yang menyebabkan d_{50} bergerak
 - debit pada kedalaman normal
 - debit sedimen (bed-load) menurut Einstein
 - jika debit sungai meningkat 67%, hitunglah kedalaman aliran
 - debit sedimen menurut MPM
 - debit sedimen menurut Frijlink
 - diameter butir minimum sbg pelindung dasar sungai

Terima kasih