

# TRANSPOR SEDIMEN SUSPENSII (SUSPENDED LOAD TRANSPORT)

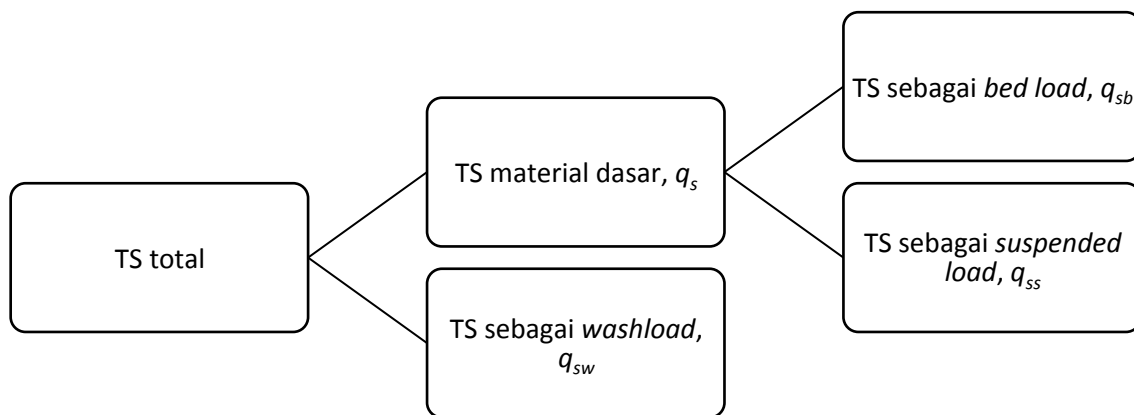
## PENGANTAR

Paparan mengenai transpor sedimen suspensi pada bahan kuliah ini disarikan dari buku referensi: Graf, W.H., dan Altinakar, M.S., 1998, *Fluvial Hydraulics*, John Wiley and Sons Ltd., Sussex, England, pp. 355-356 dan 384-393.

Para mahasiswa sangat dianjurkan untuk membaca sendiri referensi tersebut. Paparan pada catatan kuliah ini tidak dimaksudkan sebagai terjemahan format referensi asli, namun hanya sebagai bantuan kepada para mahasiswa untuk memahami materi transpor sedimen suspensi.

## JENIS TRANSPOR SEDIMEN

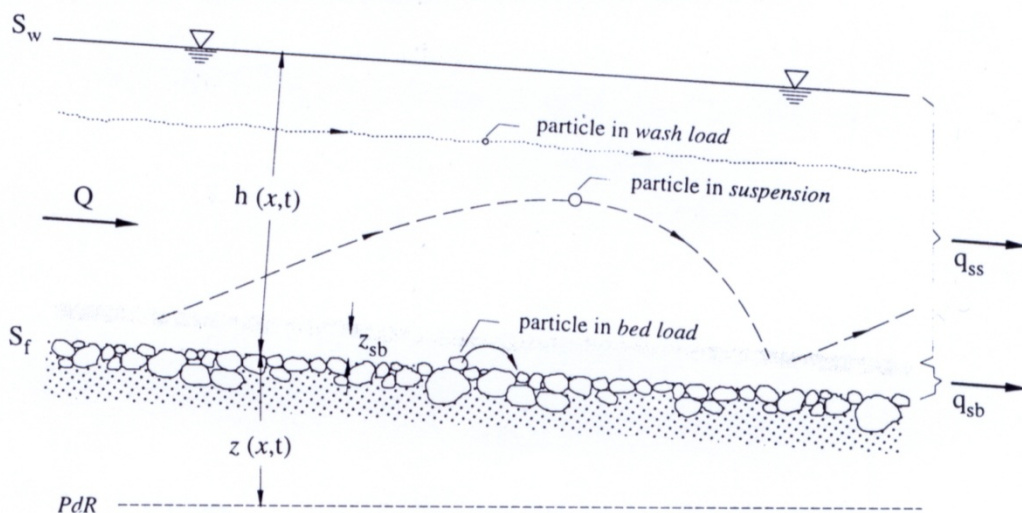
Transpor sedimen oleh aliran air adalah transpor seluruh butir padat (solid) yang melewati tampang lintang suatu aliran air. Transpor sedimen umumnya dikelompokkan berdasarkan cara transpor seperti disajikan pada skema di bawah ini.



Gambar 1: Pengelompokan cara transpor sedimen (TS)

- 1) Transpor sedimen dasar (*bed load*),  $q_{sb}$  (debit solid per satuan lebar,  $m^3/m$ ), adalah gerak butir sedimen yang selalu berada di dekat dasar saluran atau sungai. Butir sedimen bergerak dengan cara bergeser atau meluncur, mengguling, atau dengan lompatan pendek. Transpor dengan cara ini umumnya terjadi pada butir sedimen yang berukuran relatif besar.
- 2) Transpor sedimen suspensi (*suspended solid*),  $q_{ss}$ , adalah gerak butir sedimen yang sesekali bersinggungan dengan dasar sungai atau saluran. Butir sedimen bergerak dengan lompatan yang jauh dan tetap didalam aliran. Transpor dengan cara ini umumnya terjadi pada butir sedimen yang berukuran relatif kecil.

- 3) Transpor sedimen dasar+suspensi atau transpor material dasar total,  $q_s = q_{sb} + q_{ss}$ , adalah gerak butir sedimen yang selalu berkaitan atau bersinggungan dengan dasar sungai atau saluran.
- 4) Transpor sedimen *wash load*,  $q_{sw}$ , adalah gerak butir sedimen yang hampir tidak pernah bersinggungan dengan dasar sungai atau saluran. Pada *wash load*, butir sedimen bergerak bagaikan digelontor oleh aliran dan tidak pernah menyentuh dasar sungai atau saluran. Transpor dengan cara ini umumnya terjadi pada butir sedimen yang berukuran sangat halus.



Gambar 2: Skema cara transpor sedimen

Transpor sedimen, dalam hal ini erosi dasar sungai atau saluran, terjadi manakala tegangan geser dasar sungai/saluran mencapai atau melebihi tegangan geser kritis. Perbedaan cara transpor sedimen, antara transpor sedimen dasar dan transpor sedimen suspensi, tidaklah mudah dilakukan. Salah satu cara perbedaan antara kedua cara transpor tersebut adalah dengan memperhatikan nilai perbandingan antara kecepatan geser (*shear velocity*) aliran,  $u_*$ , dan kecepatan endap butir sedimen,  $v_{ss}$ . Namun perlu dicatat bahwa cara perbedaan ini haruslah dibaca sebagai cara pendekatan:

$$\frac{u_*}{v_{ss}} > 0.10 \quad \text{awal transpor sedimen dasar,}$$

$$\frac{u_*}{v_{ss}} > 0.40 \quad \text{awal transpor sedimen suspensi.}$$

Dalam paragraf-paragraf di bawah ini, dipaparkan transpor sedimen suspensi.

## TRANSPOR SEDIMEN SUSPENSIF

### MEKANISME TRANSPOR SEDIMEN SUSPENSIF

Dalam transpor sedimen suspensi, partikel sedimen bergerak dalam lompatan besar, namun dari waktu ke waktu tetap melakukan kontak dengan sedimen dasar (*bed load*) dan juga

dengan dasar saluran/sungai. Zona suspensi berada pada  $z_{sb} < z < h$ . Di sini  $z_{sb}$  adalah tebal lapis di dekat dasar saluran tempat terjadi transpor sedimen dasar (*bed load*).

Mekanisme transpor sedimen suspensi dapat dinyatakan dengan persamaan transpor konveksi-difusi. Persamaan ini memperlihatkan distribusi vertikal konsentrasi sedimen suspensi dalam aliran,  $c_s(z)$ . Pada kasus aliran permanen dan seragam (*steady uniform flow*), distribusi vertikal konsentrasi sedimen suspensi dapat dituliskan dalam bentuk sebagai berikut:

$$v_{ss} \frac{\partial c_s}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \varepsilon_s \frac{\partial c_s}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

Dalam persamaan di atas,  $c_s(z)$  adalah konsentrasi volumik lokal,  $\varepsilon_s$  adalah koefisien difusi (*diffusivity*) butir sedimen suspensi (satuan  $L^2/T$ ), dan  $v_{ss}$  adalah kecepatan endap butir sedimen suspensi. Persamaan di atas menunjukkan hubungan antara transfer butir padat (sedimen) ke arah atas karena turbulensi dan gerak butir sedimen ke bawah karena gravitasi (dinyatakan dalam kecepatan endap,  $v_{ss}$ ). Persamaan tersebut hanya berlaku apabila konsentrasi sedimen rendah, yaitu  $(1 - c_s) \approx 1$  atau  $c_s < 0.1\%$ .

Apabila persamaan di atas diintegrasikan ke seluruh kedalaman aliran (dari  $z_{sb}$  s.d.  $h$ ), maka diperoleh persamaan berikut:

$$v_{ss} c_s + \varepsilon_s \frac{dc_s}{dz} = Cte = 0 \quad (2)$$

Dalam mengintegrasikan, konstanta integrasi, *Cte*, ditetapkan sama dengan nol, yang mengandung arti bahwa konsentrasi sedimen suspensi di permukaan aliran sama dengan nol,  $c_s = 0$ , untuk koefisien difusi sama dengan nol,  $\varepsilon_s = 0$ .

Persamaan (2) memperlihatkan bahwa di seluruh kedalaman aliran,  $z_{sb} < z < h$ , terjadi keseimbangan antara gerak ke bawah karena gravitasi dan gerak (difusi) ke atas karena gradien konsentrasi ke atas. Dengan kata lain, laju gerak sedimen (konveksi) ke bawah per satuan volume sama dengan laju difusi turbulen ke atas per satuan volume.

Untuk konsentrasi sedimen yang sedikit lebih besar, persamaan di atas perlu disesuaikan menjadi sebagai berikut:

$$v_{ss} c_s (1 - c_s) + \varepsilon_s \frac{dc_s}{dz} = Cte = 0 \quad (3)$$

Satu catatan mengenai koefisien difusi perlu diungkapkan. Pada umumnya, koefisien difusi butir sedimen suspensi,  $\varepsilon_{is}$ , dapat dikaitkan dengan koefisien difusi suatu zat terlarut dalam air,  $\varepsilon_t$ , menurut hubungan sebagai berikut:

$$\varepsilon_s = \beta_s \varepsilon_t \quad (4)$$

Dalam hal ini,  $\beta_s$  adalah suatu faktor perbandingan. Mengingat butir sedimen suspensi umumnya sangat lembut dan konsentrasi sedimen suspensi dalam aliran sangat rendah, maka dapat dipandang bahwa butir sedimen suspensi bergerak (mengalir) bersama-sama dengan aliran air, sehingga faktor perbandingan ini dapat dianggap sama dengan satu,  $\beta_s = 1$ .

Apabila koefisien difusi bukan merupakan fungsi kedalaman, jadi  $\varepsilon_s$  tidak bergantung pada  $z$ , maka nilai koefisien difusi adalah konstan,  $\varepsilon_s = Cte$ . Dalam hal demikian, maka Persamaan (2) menjadi:

$$\frac{c_s}{c_{sa}} = \exp \left[ -\frac{v_{ss}}{\varepsilon_s} (z - a) \right] \quad (5)$$

Dalam persamaan di atas,  $c_{sa}$  adalah konsentrasi sedimen suspensi di posisi kedalaman referensi,  $z = a$ .

Dalam aliran uni-direksional di sebuah saluran terbuka, koefisien difusi memiliki distribusi vertikal seperti halnya distribusi turbulensi, yang dinyatakan dengan persamaan parabolik berikut:

$$\varepsilon_s = \kappa u_*' \frac{z}{h} (h - z) \quad (6)$$

Dalam persamaan tersebut,  $\kappa$  adalah konstanta Karman ( $\kappa = 0.4$ ) dan  $u_*'$  adalah kecepatan gesek (*friction velocity*) berdasarkan butir sedimen. Ingat, kecepatan gesek dapat dibedakan menjadi dua bagian, yaitu kecepatan gesek akibat butir sedimen,  $u_*'$ , dan kecepatan gesek akibat bentuk dasar sungai (*bedform*),  $u_*''$ . Kecepatan gesek total,  $u_*$ , merupakan penjumlahan kedua bagian tersebut:

$$u_*^2 = (u_*')^2 + (u_*'')^2 \quad (7)$$

Substitusi Persamaan (6) kedalam Persamaan (2) menghasilkan persamaan berikut:

$$v_{ss} c_s + \kappa u_*' \frac{z}{h} (h - z) \frac{dc_s}{dz} = 0$$

Dengan pengaturan suku-suku dalam persamaan tersebut, diperoleh persamaan di bawah ini:

$$\frac{dc_s}{c_s} = -\frac{v_{ss}}{\kappa u_*'} \left( \frac{h}{h - z} \right) \frac{dz}{z} \quad (8)$$

Selanjutnya, dikenal faktor eksponen Rouse yang didefinisikan sebagai berikut:

$$\zeta = \frac{v_{ss}}{\kappa u_*'} \quad \text{atau} \quad \zeta' = \frac{v_{ss}}{\beta_s \kappa u_*'}$$

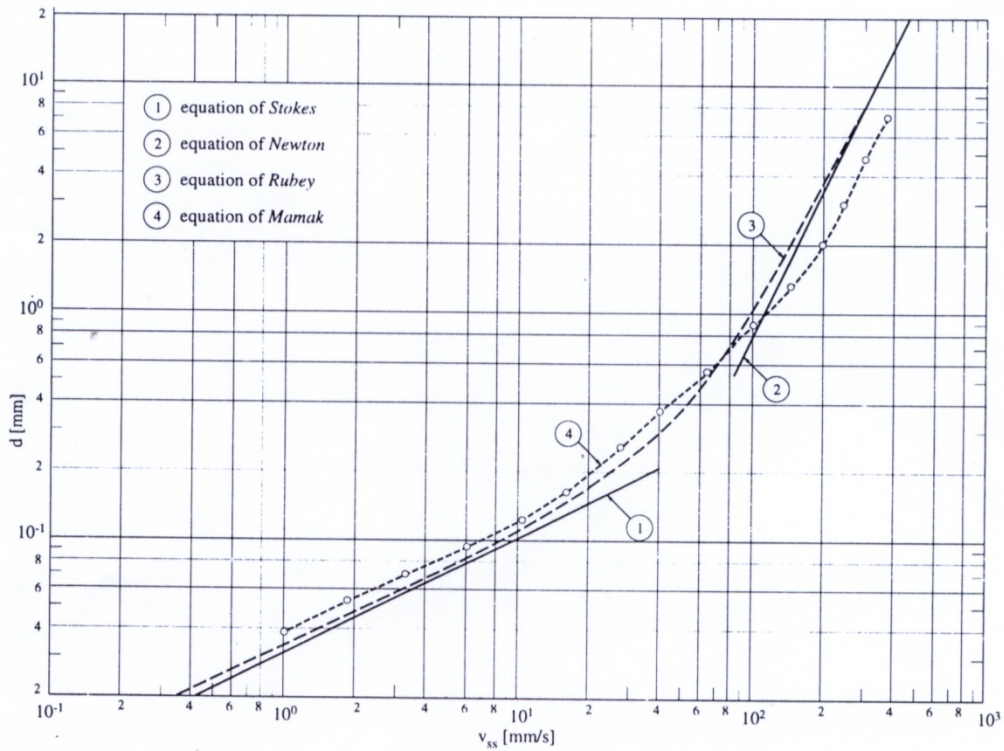
Kemudian, Persamaan (8) diintegalkan bagian per bagian dengan batas integrasi  $a < z < h$  dan menghasilkan persamaan di bawah ini:

$$\frac{c_s}{c_{sa}} = \left( \frac{h - z}{z} \frac{a}{h - a} \right)^\zeta \quad (9)$$

Dalam persamaan di atas,  $c_{sa}$  adalah konsentrasi di kedalaman referensi,  $a$ . Persamaan di atas mencerminkan distribusi konsentrasi relatif,  $c_s/c_{sa}$ , untuk satu ukuran butir sedimen,  $v_{ss}$  dan  $\zeta$ .

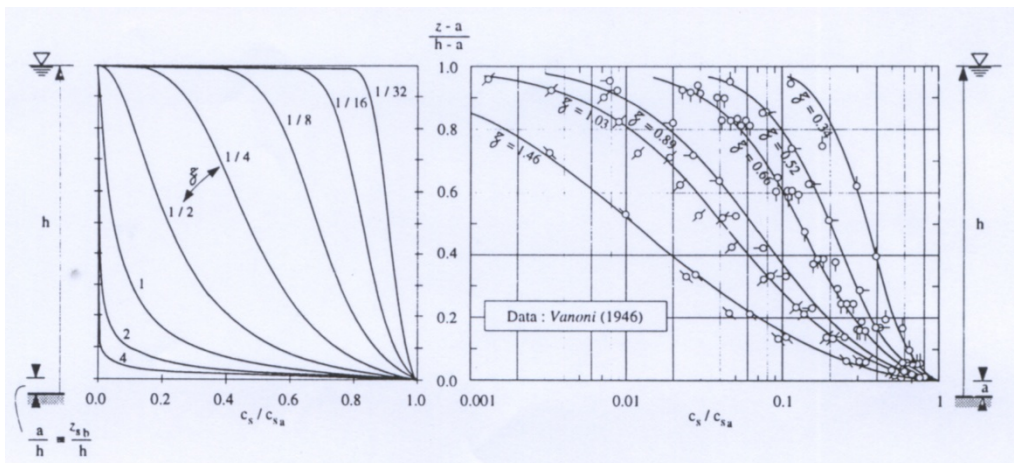
Ingat, dalam menetapkan konstanta (faktor eksponen) Rouse,  $\zeta$ , kecepatan gesek haruslah dihitung berdasarkan ukuran butir sedimen,  $u_*'$ .

Di samping itu, dalam menetapkan faktor eksponen Rouse, kecepatan endap haruslah ditetapkan berdasarkan kecepatan endap butir sedimen dalam air jernih dan diam/tenang, sehingga kecepatan endap ini tidak dipengaruhi oleh konsentrasi sedimen maupun turbulensi. Untuk sebuah butir pasir kuarsa,  $s_s = 2.65$ , di dalam air jernih dan tenang pada temperatur  $T = 20^\circ\text{C}$ , maka kecepatan endap dapat ditetapkan dengan memakai grafik pada Gambar 3.



Gambar 3: Kecepatan endap,  $v_{ss}$ , sebagai fungsi diameter butir sedimen,  $d$

Kurva distribusi vertikal konsentrasi sedimen suspensi menurut Persamaan (9) ditampilkan pada Gambar 4. Dari distribusi tersebut, tampak bahwa:



Gambar 4: Distribusi vertikal konsentrasi sedimen suspensi,  $c_s/c_{sa}$

- 1) Untuk nilai  $\zeta$  kecil, tampak konsentrasi sedimen yang besar dan cenderung berdistribusi secara seragam di seluruh kedalaman aliran.
- 2) Untuk nilai  $\zeta$  besar, konsentrasi sedimen kecil di permukaan aliran dan besar di dekat dasar saluran.
- 3) Ukuran butir sedimen, dicerminkan oleh nilai kecepatan endap,  $v_{ss}$ , berpengaruh langsung terhadap bentuk distribusi vertikal sedimen suspensi.
- 4) Sangat dekat dengan dasar saluran,  $z \approx 0$ , konsentrasi sedimen bernilai sangat besar tak berhingga,  $c_s = \infty$ , menuju suatu nilai yang tak mungkin terjadi. Oleh karena itu, didefinisikan suatu kedalaman referensi,  $a \equiv z_{sb} \approx 0.05h$ , atau  $z_{sb} = 2d$ , yang membatasi bagian bawah tempat terjadi *bed load* dan bagian atas tempat terjadi *suspended load*.
- 5) Konsentrasi sedimen referensi,  $c_a$ , umumnya dipandang sebagai konsentrasi sedimen di kedalaman  $a = z_{sb}$ . Konsentrasi ini dihitung dengan persamaan *bed load*,  $q_{sb}$ .

### PERSAMAAN TRANSPOR SEDIMEN SUSPENSII

Debit sedimen suspensi per satuan lebar, di kedalaman  $z_{sb} < z < h$ , diperoleh dengan mengintegalkan debit di setiap kedalaman:

$$q_{ss} = \int_{z_{sb}}^h c_s u dz \quad (10)$$

Dalam persamaan tersebut,  $c_s(z)$  adalah konsentrasi lokal di kedalaman  $z$  dan  $u(z)$  adalah kecepatan aliran lokal di kedalaman  $z$ . Persamaan di atas berlaku untuk **satu** butir sedimen berukuran  $d$  atau berkecepatan endap  $v_{ss}$ .

Paragraf-paragraf di bawah ini memaparkan persamaan Einstein untuk menghitung transpor sedimen suspensi.

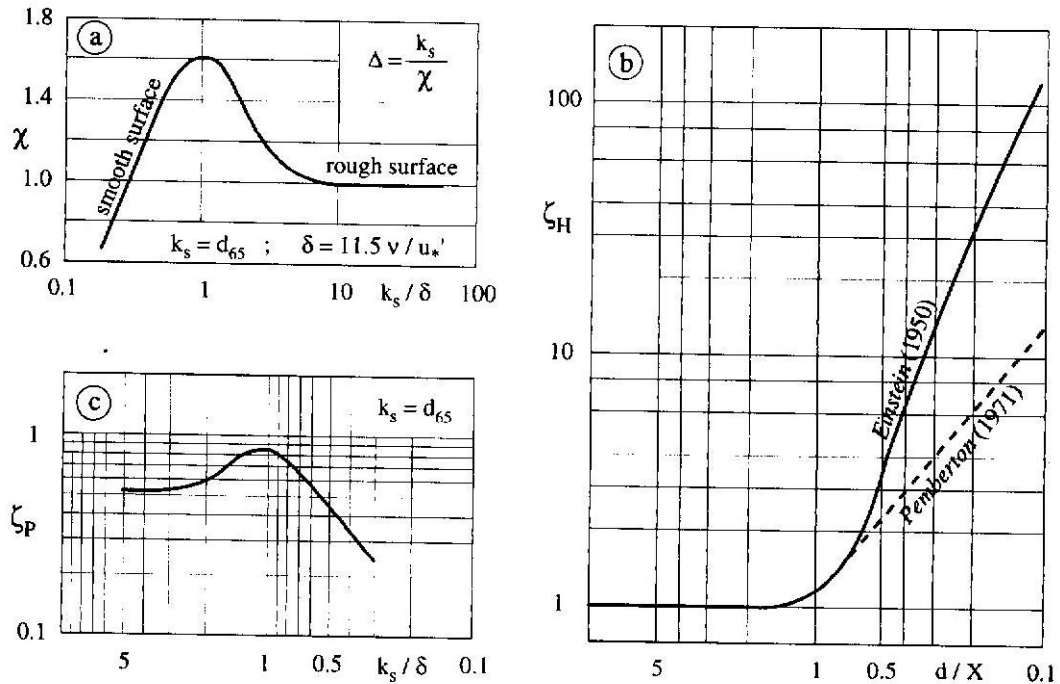
Persamaan transpor sedimen suspensi Einstein diturunkan dari Persamaan (10). Dalam persamaan tersebut konsentrasi sedimen  $c_s$  dihitung dengan Persamaan (9) dan kecepatan aliran  $u$  dinyatakan dengan persamaan logaritmik berikut:

$$u_z = u'_* 5.75 \log \left( 30.2 \frac{z}{\Delta} \right) \quad (11)$$

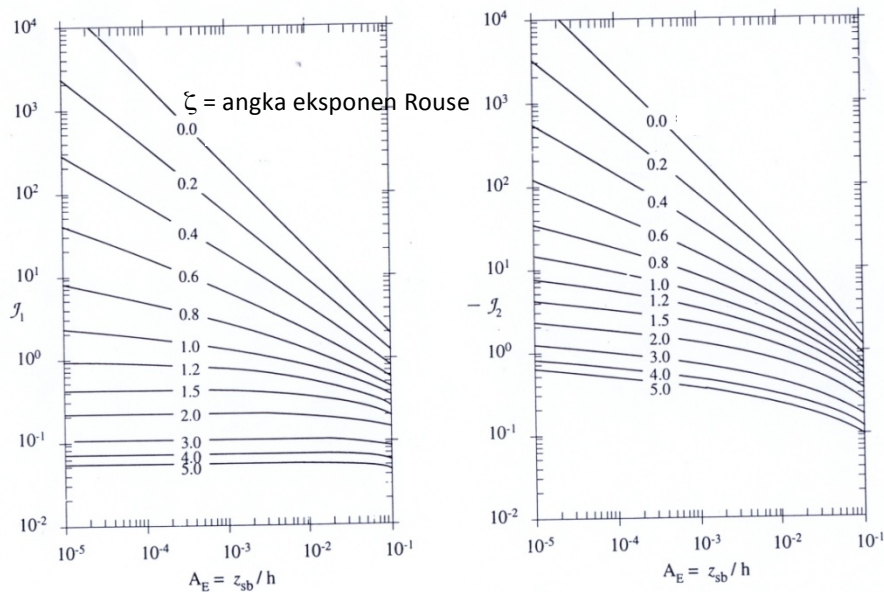
Dalam persamaan tersebut,  $\Delta$  adalah faktor koreksi yang diperoleh dari Gambar 5a dan  $u'_*$  adalah kecepatan gesek berdasarkan butir sedimen. Dengan berbagai langkah manipulasi matematis, akhirnya diperoleh persamaan transpor sedimen suspensi berikut:

$$q_{ss} = 11.6 c_{sa} u'_* z_{sb} \left[ 2.303 \log \left( 30.2 \frac{h}{\Delta} \right) I_1 + I_2 \right] \quad (12)$$

Dalam persamaan di atas,  $q_{ss}$  adalah debit solid per lebar saluran/sungai akibat transpor sedimen suspensi.



Gambar 5: Koefisien koreksi: a) distribusi kecepatan, b) hiding factor, c) gaya angkat



Gambar 6: Nilai integral  $I_1$  dan  $I_2$  pada persamaan transpor sedimen suspensi Einstein

Konsentrasi sedimen acuan (*reference concentration*),  $c_{sa}$ , adalah konsentrasi di tempat yang sangat dekat dengan dasar saluran/sungai. Titik ini ditempatkan di dalam lapis transpor sedimen dasar. Lapis ini dikenal dengan nama lapis dasar (*bed layer*). Umumnya, tebal lapis ini dianggap sama dengan dua kali diameter butir sedimen,  $z_{sb} = 2d$ .

Hubungan antara transpor sedimen suspensi dengan transpor sedimen dasar dapat dilihat melalui konsentrasi sedimen acuan,  $c_{sa}$ . Apabila transpor sedimen dasar dihitung dengan Persamaan Einstein, maka ada hubungan antara konsentrasi sedimen acuan dan transpor sedimen dasar sebagai berikut:

$$C_{sa} = \frac{a_{sb} i_{sb}}{11.6 u_*' z_{sb}} \quad (13)$$

Dengan demikian, debit solid yang berupa transpor sedimen suspensi per lebar saluran/sungai adalah:

$$q_{ss} i_{ss} = q_{sb} i_{sb} \left[ 2.303 \log \left( 30.2 \frac{h}{\Delta} \right) I_1 + I_2 \right] \quad (14)$$

Dalam persamaan di atas,  $q_{ss} i_{ss}$  adalah debit solid per lebar saluran/sungai yang bergerak dalam suspensi (transpor sedimen suspensi) untuk satu fraksi granulometrik. Persamaan ini menyatakan keterkaitan antara transpor sedimen dasar dan transpor sedimen suspensi.

-o0o-