

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Transpor sedimen merupakan salah satu fenomena alam yang sering dijumpai pada berbagai macam saluran terbuka, sungai-sungai alam dan reservoir (waduk). Dalam bidang rekayasa keairan, studi transpor sedimen dengan segala fenomenanya merupakan suatu hal yang sangat penting, terutama diperlukan dalam merencanakan, merancang dan mengoperasikan berbagai bangunan air dan pembuangan, misalnya bangunan irigasi, operasi waduk, instalasi penjernihan air minum (penentuan tempat pengambilan air/*water intakes*), instalasi pembuangan air limbah, dan lain-lain.

Ditinjau dari aspek fisik sedimen suspensi yang terdiri dari partikel-partikel lanau (*silt*) dan lempung (*clay*) dapat berada dalam suatu ikatan suspensi dalam periode yang cukup lama, sehingga mengakibatkan kekeruhan pada aliran, hal ini dapat diamati dengan jelas bahwa pada kondisi alam yang sesungguhnya (saluran atau sungai-sungai) sering terlihat keruh, dan partikel-partikel tersebut dapat mengendap pada suatu saat, sehingga mengakibatkan pendangkalan pada dasar saluran atau sungai tersebut, dan lebih merugikan apabila sungai tersebut bermuara ke suatu waduk yang akan mengakibatkan terjadinya pendangkalan pada dasar waduk. Oleh karena itu pengetahuan mengenai kuantitas dan karakteristik sedimen suspensi sangatlah penting dalam bidang pengembangan water resources. Misalnya diperlukan informasi mengenai debit sedimen dalam kurun waktu tertentu, profil distribusi konsentrasi sedimen suspensi dan komposisi ukuran partikelnya. Disamping itu akibat adanya muatan sedimen suspensi pada aliran akan mengakibatkan menurunnya kualitas air, yang akan berdampak negatif pada pemakaian air untuk keperluan irigasi, perikanan, penyediaan air bersih dan lain-lain, sebab pada sedimen suspensi terdapat ion-ion metal, peptisida, nutrient dan zat-zat lain yang terserap bersama kedalam partikel-partikel sedimen yang terangkut.

Fenomena sedimen suspensi yang terjadi pada saluran atau sungai-sungai merupakan peristiwa yang cukup kompleks, karena dipengaruhi oleh fluktuasi aliran turbulen secara kontinyu sepanjang saluran.

Transpor muatan sedimen suspensi yang terjadi pada saluran atau sungai memerlukan waktu yang relatif lama dalam proses pengendapannya, karena sifatnya

yang melayang dalam kurun waktu tertentu yang disebabkan oleh efek turbulensi arus alirannya, oleh karena keberadaannya sedemikian rupa pada aliran sehingga sering menimbulkan permasalahan tersendiri dalam pemanfaatan air sungai, maka perlu adanya prediksi distribusi konsentrasi sedimen suspensi (selanjutnya dapat dihitung transport sedimen suspensi) pada saluran atau sungai untuk tujuan-tujuan pemanfaatan air sungai.

B. Perumusan Masalah

Dari uraian fenomena sedimen suspensi di atas, dapat dirumuskan bahwa distribusi partikel sedimen suspensi dipengaruhi oleh fluktuasi turbulensi aliran, khususnya yang terjadi pada saluran atau sungai-sungai. Dengan demikian untuk memvisualisasikan profil distribusi konsentrasi sedimen suspensi pada suatu tampang vertikal dapat digunakan pendekatan model aliran turbulen. Model yang digunakan dibatasi hanya pada jenis aliran *steady-uniform*, karena perubahan konsentrasi pada ruang dan waktu berikutnya tidak akan menunjukkan perbedaan yang berarti dengan konsentrasi sebelumnya. Seperti yang telah diasumsikan oleh Jansen *et.al.* (1979 : 125) bahwa pada jarak tertentu ($x = \infty$) konsentrasi sedimen suspensi telah mencapai kondisi keseimbangan. Dengan demikian $\int C(\infty, z) u(z) dz$ adalah sama dengan transport pada kondisi *steady*, hal ini memberikan informasi yang cukup untuk menghitung konsentrasi $C(x, a)$.

C. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengukur dan memprediksi distribusi sedimen suspensi serta distribusi kecepatan pada arah vertikal penampang saluran, sehingga diperoleh profil distribusi konsentrasi sedimen suspensi dan profil distribusi kecepatan untuk menyelesaikan permasalahan transport sedimen suspensi pada saluran atau sungai. Selain itu juga untuk mengetahui pengaruh turbulensi aliran pada penyebaran konsentrasi partikel-partikel sedimen suspensi.

D. Manfaat yang Diharapkan

Perhitungan yang akurat dari konsentrasi sedimen suspensi pada beberapa zona tampang sungai adalah sangat penting untuk menghitung sejumlah sedimen suspensi yang ditranspor oleh air pada kedalaman tertentu. Dengan adanya suatu pola pengukuran yang dapat memprediksi profil kuantitas sedimen suspensi pada suatu tampang sungai atau saluran, maka diharapkan dapat diketahui pada wilayah mana akumulasi partikel-partikel sedimen suspensi berada, sehingga pemanfaatan air pada saluran bersedimen dapat lebih efisien.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Profil Konsentrasi Sedimen Suspensi

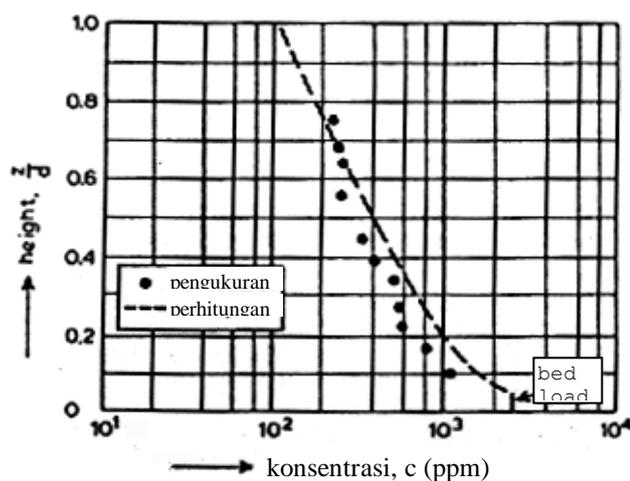
Mekanisme utama yang menyebabkan sedimen diangkut dalam aliran air adalah adanya kecepatan fluida dan tegangan geser serta tegangan normal yang dihasilkan dari turbulensi aliran. Tegangan gesek akibat fluktuasi turbulen atau tegangan gesek Reynolds ini bekerja pada air dan sedimen, sehingga perilaku dinamik dari aliran fluida ini kemudian dihitung sebagai profil konsentrasi sedimen suspensi. Pengaruh kecepatan fluida dan turbulensi aliran pada transpor sedimen adalah dominan bila sedimen terdiri dari partikel-partikel halus.

B. Intensitas Turbulen

Turbulensi merupakan faktor terpenting dalam mempelajari fenomena sedimen suspensi, turbulensi adalah pergerakan tidak beraturan partikel-partikel aliran fluida yang dihasilkan dari pusaran-pusaran aliran sepanjang saluran. Jika suatu aliran turbulen *steady* diamati pada suatu titik, maka kecepatannya akan berfluktuasi terhadap waktu, besar dan arahnya. Dengan hadirnya partikel-partikel sedimen suspensi pada aliran, maka menurut Vanoni (1946) turbulensi dapat diredam, demikian pula menurut Lyn (1988) bahwa pengaruh lokal terbesar dari hadirnya partikel-partikel sedimen ini pada profil kecepatan adalah pada wilayah dalam (*inner region*), yaitu berkurangnya nilai kecepatan pada wilayah ini. Wang dan Qian (dalam Wang Z. and Larsen P., 1994) telah mengukur intensitas turbulen untuk aliran yang mengangkut pasir halus (0.15 mm) dan partikel plastik (*neutrally buoyant plastic particles*) berukuran 0.26-1.4 mm dengan menggunakan *total pressure probe*. Hasilnya dari kedua jenis partikel tersebut menunjukkan intensitas turbulen yang kecil, dijelaskan pula bahwa antara *bed load* dan *suspended load* mempunyai pengaruh yang berbeda pada struktur turbulensi aliran, pergerakan partikel-partikel akan meningkatkan turbulensi jika mereka bergerak sebagai *bed load* dan akan menurunkan turbulensi jika mereka bergerak sebagai *suspended load*. Kemudian hasil studi eksperimental (Wang X. and Qian N., 1989) menunjukkan bahwa intensitas turbulen berkurang dengan bertambahnya konsentrasi sedimen.

C. Konsentrasi Sedimen Suspensi

Profil konsentrasi sedimen suspensi dari hasil eksperimen Barton-Lin (Van Rijn, 1984), salah satunya ditunjukkan pada Gambar 2.1, pengukuran konsentrasi sedimen suspensi dilakukan pada Enoree River, Mississippi River dan pada suatu estuari di Netherland (Eastern Scheldt); dengan kedalaman yang bervariasi dari 0.1 - 25 meter, variasi kecepatan antara 0.4 - 1.6 m/s dan ukuran butiran sedimen dari 180 - 700 μm . Dari hasil pengukuran tampak bahwa konsentrasi sedimen suspensi pada dasar lebih besar bila dibandingkan dengan konsentrasi di permukaan, demikian juga hasil perhitungannya menunjukkan fenomena yang sama. Sedangkan konsentrasi pada dasar atau dekat dasar sekali tidak terdapat data hasil pengukuran, hal ini disebabkan pada dasar sungai fenomenanya sudah merupakan angkutan bed load, sehingga sulit diperoleh data sedimen suspensi.



Gambar 2.1 Profil konsentrasi hasil eksperimen Barton-Lin.(Van Rijn, 1984 : 1628).

D. Gerakan Sedimen Suspensi

Pada kondisi tertentu partikel-partikel bed load bergerak dari dasar, demikian pula halnya dengan material-material berbutir halus yang berada dalam aliran yang ditranspor dalam bentuk suspensi, partikel-partikel butiran bagaimanapun kecilnya mempunyai berat (gaya berat/gravitasi) dan dalam aliran ada gaya yang menggerakannya, terutama gerakan ini diakibatkan oleh adanya turbulensi atau fluktuasi aliran, sehingga bila gaya berat partikel tersebut lebih besar dari gaya yang menggerakannya, maka partikel cenderung untuk mengendap pada kondisi tertentu. Fenomena pergerakan sedimen-suspensi ini cukup kompleks bila dibandingkan dengan

fenomena *bed load*, masuknya partikel sedimen kedalam suspensi dapat mempengaruhi proses kejadian berikutnya sebagai awal pergerakan dari *bed load*, yaitu sebagai kondisi kritik pada pergerakan yang baru. Pada kondisi yang baru ini partikel dalam keadaan diam di dasar, dan bekerja gaya gesek dan gaya hidrodinamik yang saling tegak lurus dengan partikel terdahulu. Sebagai gaya tambahan lain adalah gaya gravitasi dan gaya apung (*buoyancy*).

Partikel sedimen dikatakan bergerak secara melayang (*suspended load*) bilamana partikel tersebut bergerak tanpa menyentuh dasar saluran. Karena adanya pengaruh gaya berat, partikel-partikel tersebut cenderung untuk mengendap. Kecenderungan untuk mengendap ini akan dilawan oleh gerakan partikel zat cair, yaitu komponen fluktuasi kecepatan dari aliran turbulen. Dengan kata lain kondisi aliran yang ada akan menentukan apakah suatu fraksi sedimen akan bergerak sebagai sedimen suspensi atau bukan. Kemudian suatu partikel yang pada suatu kondisi aliran tertentu bergerak secara melayang, pada kondisi aliran yang lain dapat bergerak sebagai angkutan sedimen dasar, demikian pula sebaliknya. Sehingga dapat disimpulkan adanya keterkaitan antara *suspended load* dengan *bed load*, dan antara *bed load* dengan dasar saluran/sungai dimana angkutan terjadi. Pada suatu aliran dalam saluran terbuka, batas atas dimana terjadi angkutan sedimen suspensi dapat ditentukan dengan jelas, yaitu pada permukaan air bebas (*free water surface*), sedangkan batas bawahnya agak sulit untuk didefinisikan secara tepat. Sangat dekat dengan dasar, akan menjadi lebih sulit lagi untuk mendefinisikan batasan antara angkutan sedimen suspensi dengan sedimen dasar. Angkutan sedimen melayang sering disertai dengan angkutan material dasar, dan transisi antara dua metode transpor tersebut dapat terjadi secara bertahap, sesuai dengan perubahan kondisi aliran. Umumnya aliran sungai keadaannya adalah turbulen, oleh karena itu tenaga gravitasi partikel sedimen dapat ditahan oleh gerakan turbulensi (fluktuasi) aliran dan pusaran arus yang akan membawa partikel sedimen kembali ke atas. Dari uraian ini jelas bahwa angkutan sedimen suspensi dapat dibedakan menjadi tiga keadaan :

1. apabila tenaga gravitasi partikel sedimen lebih besar dari pada tenaga turbulensi aliran, maka partikel sedimen akan mengendap dan pada dasar sungai akan terjadi proses aggradasi,

2. apabila tenaga gravitasi partikel sedimen sama dengan tenaga turbulensi aliran, maka akan terjadi keadaan seimbang (*equilibrium*) dan partikel sedimen tersebut tetap konstan terbawa aliran sungai ke hilir,
3. apabila tenaga gravitasi partikel sedimen lebih kecil dari pada tenaga turbulensi aliran, maka dasar sungai akan terkikis dan akan terjadi degradasi pada dasar sungai.

Berikut ini penjelasan sederhana mengenai pergerakan sedimen-suspensi yang diajukan oleh Sutherland (Bogardi, 1978 : 346) :

1. Pada aliran turbulen selalu terjadi pusaran-pusaran (*vortex/eddies*). Pada waktu pusaran-pusaran tersebut mendekati dasar, pusaran tersebut akan terdistorsi yang mengakibatkan meningkatnya kecepatan pusaran yang akan mempengaruhi lapisan permukaan dari partikel pada dasar. Akibatnya adalah bahwa tegangan geser lokal pada titik tersebut akan bertambah, yang selanjutnya menyebabkan menggulingnya partikel sedimen, dan terjadilah proses awal pergerakan butiran. Karena ukuran dari pusaran-pusaran pada aliran turbulen lebih besar dari pada ukuran partikel, maka banyak partikel yang akan bergerak, yang kemudian akan diendapkan pada tempat lain yang tidak terpengaruh oleh pusaran-pusaran aliran. Pada waktu bergerak, bilamana kondisinya memungkinkan partikel-partikel tersebut akan mudah tertarik karena pengaruh komponen kecepatan vertikal. Jika komponen kecepatan tersebut cukup besar, partikel akan terangkat dan terlepas dari dasar sehingga terjadi pergerakan partikel sebagai suspensi.
2. Faktor lain yang ikut berperan adalah gaya angkat yang bekerja pada partikel. Demikian pula jika dasar bergelombang (*riple* atau *dune*), kondisi dasar akan mempermudah terjadinya penarikan sedimen lepas dari dasar, hal ini terutama terjadi pada daerah cekungan dari gelombang-gelombang dasar.

Ibad Zade (dalam Bogardi, 1978) melakukan penelitian tentang mekanisme suspensi dengan pendekatan teoritis dan eksperimental. Menurutnya pergerakan sedimen suspensi terjadi bila perbandingan antara kecepatan rata-rata aliran (U) dengan kecepatan kritik (U_c) lebih besar atau sama dengan 1.3 ($U/U_c \geq 1.3$). Untuk nilai U/U_c antara 1 sampai dengan 1.3 sedimen hanya bergerak sebagai *bed load*.

E. Awal Gerak Suspensi

Beberapa kondisi aliran dapat menentukan awal gerak suspensi. Bagnold (dalam Van Rijn, 1984 : 1614) mengemukakan bahwa suatu partikel solid hanya akan tetap dalam suspensi bila pusaran-pusaran turbulen (*the turbulent eddies*) mendominasi komponen kecepatan vertikal yang nilainya lebih besar dari pada kecepatan jatuh partikel (W_s). Diasumsikan bahwa komponen kecepatan vertikal pusaran-pusaran (w') dinyatakan dengan intensitas turbulensi vertikal (\bar{w}). Nilai awal gerak suspensi kritik dinyatakan dengan :

$$\bar{w} = \left[\overline{(w')^2} \right]^{0.5} \geq W_s \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

Hasil studi lebih lanjut tentang fenomena turbulensi pada aliran lapisan batas mengusulkan bahwa nilai maksimum intensitas turbulensi vertikal (\bar{w}) adalah sama dengan kecepatan gesek dasar (U^*). Dengan menggunakan nilai-nilai ini, kecepatan gesek dasar kritikal (U^*_{cr}) untuk awal gerak suspensi adalah :

$$\frac{U^*_{cr}}{W_s} = 1 \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

dan dapat dinyatakan sebagai :

$$\theta_{cr} = \frac{(U^*_{cr})^2}{(s-1)gD_{50}} = \frac{W_s^2}{(s-1)gD_{50}} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

yang dapat dihitung berdasarkan pada grafik Shields (Gambar 3.1).

Kriteria lain awal gerak suspensi diberikan oleh Engelund (Van Rijn, 1984) berdasarkan pada analisis stabilitas yang agak kasar, Engelund mendapatkan nilai :

$$\frac{U^*_{cr}}{W_s} = 0.25 \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

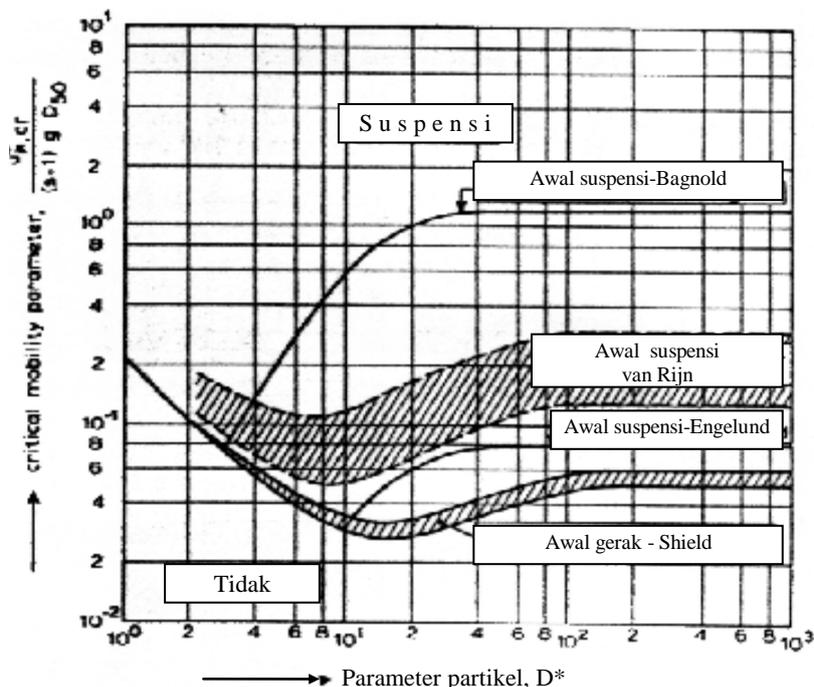
Kemudian studi eksperimental yang dilakukan di Laboratorium Hidraulik Delf oleh Leo Van Rijn menentukan kondisi aliran kritik pada pergerakan turbulen ke atas sesaat dari partikel-partikel sedimen dengan orde panjang loncatan 100 diameter partikel. Hasil eksperimentalnya adalah :

$$\frac{U^*_{cr}}{W_s} = \frac{4}{D^*} \quad \text{untuk} \quad 1 < D^* < 10 \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

$$\frac{U^*_{cr}}{W_s} = 0.4 \quad \text{untuk} \quad D^* > 10 \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

$$D^* = D_{50} \left[\frac{(s - 1)g}{\nu^2} \right]^{1/3} \dots\dots\dots (2.7)$$

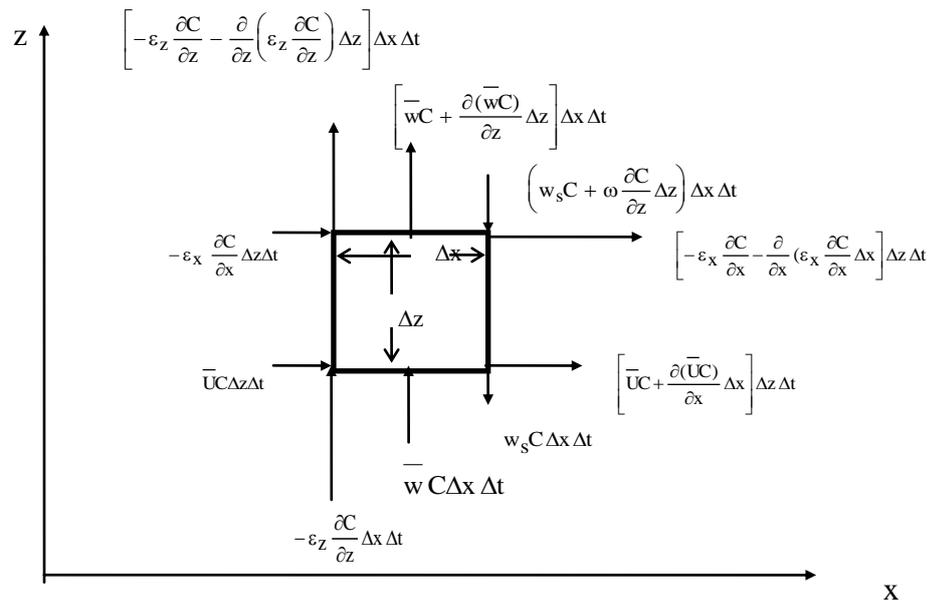
dengan D^* = parameter partikel; D_{50} = diameter partikel material dasar (diameter menengah); s = densitas spesifik; g = percepatan gravitasi; ν = viskositas kinematik; Ws = kecepatan jatuh partikel.



Gambar 2.2. Awal gerak dan suspensi (sumber : Van Rijn, 1984).

F. Persamaan Umum Diffusi

Penurunan persamaan untuk aliran *unsteady*, distribusi nonuniform sedimen pada suatu aliran *steady uniform* dua dimensi, pernyataannya dikembangkan dalam waktu yang singkat Δt , yaitu aliran sedimen yang masuk ke dalam elemen volume dikurangi dengan aliran yang keluar adalah sama dengan perubahan konsentrasi pada volume tersebut. Pada Gambar 2.3 menunjukkan aliran sedimen dalam waktu Δt yang masuk dan keluar elemen volume dalam arah x dan z yang diakibatkan oleh aliran air dan difusi. Gambar 2.3 berikut menunjukkan aliran sedimen dalam waktu Δt masuk dan keluar dari elemen volume dalam arah x dan z yang disebabkan oleh aliran air dan difusi.



Gambar 2.3. Angkutan sedimen masuk dan keluar elemen volume dalam aliran dua dimensi untuk sumbu horizontal x.

Lebar elemen normal pada bidang x-z diambil sama dengan satu/unity dan sumbu-x diambil horizontal. Pada Gambar 2.3, \bar{U} dan \bar{w} adalah komponen-komponen kecepatan aliran sejajar dengan sumbu-x dan sumbu-z, serta ε_x dan ε_z adalah koefisien diffusi untuk sedimen dalam arah x dan z. Aliran sedimen karena pengendapan pengaruh gravitasi dinotasikan dengan dua term yang mengandung kecepatan pengendapan w_s . Disini tidak ada kontribusi sedimen yang melewati luas bidang sejajar dengan bidang x-z, karena kecepatan rata-rata dan gradien konsentrasi normal, keduanya nol. Persamaan diferensial untuk konsentrasi adalah dengan menyamakan kontribusi sedimen dari arah x dan z terhadap peningkatan konsentrasi dalam elemen volume pada waktu Δt (Vanoni, 1977: 72-74). Persamaan ini dapat ditulis sbb.:

$$\left[-\frac{\partial}{\partial x}(\bar{U}C) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial z}(\bar{w}C) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\varepsilon_z \frac{\partial C}{\partial z}\right) + w_s \frac{\partial C}{\partial z} \right] \Delta z \Delta x \Delta t = \frac{\partial C}{\partial t} \Delta z \Delta x \Delta t \quad \text{.. (2.8)}$$

Jika dibagi dengan $\Delta z \Delta x \Delta t$ maka :

$$-\bar{U} \frac{\partial C}{\partial x} - C \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \varepsilon_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial x} - \bar{w} \frac{\partial C}{\partial z} - C \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \varepsilon_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \frac{\partial \varepsilon_z}{\partial z} \frac{\partial C}{\partial z} + w_s \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial C}{\partial t}$$

$$-\bar{U} \frac{\partial C}{\partial x} - \bar{w} \frac{\partial C}{\partial z} - C \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) + \varepsilon_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial x} + \varepsilon_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \frac{\partial \varepsilon_z}{\partial z} \frac{\partial C}{\partial z} + w_s \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial C}{\partial t}$$

dengan catatan bahwa persamaan kontinuitas : $\frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0$, maka :

$$-\bar{U} \frac{\partial C}{\partial x} - \bar{w} \frac{\partial C}{\partial z} + \varepsilon_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial x} + \varepsilon_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \frac{\partial \varepsilon_z}{\partial z} \frac{\partial C}{\partial z} + w_s \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial C}{\partial t} \dots\dots\dots (2.9)$$

Jika distribusi sedimen adalah steady dan uniform, dan aliran rata-rata adalah horizontal yaitu pada arah x, maka $\frac{\partial C}{\partial x} = 0$, $\bar{w} = 0$ dan seluruh turunan yang berkaitan

dengan x adalah nol. Dalam kondisi ini pada persamaan di atas dengan $\varepsilon_z = \varepsilon_s$, maka persamaan menjadi ;

$$\varepsilon_s \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} \frac{\partial C}{\partial z} + w_s \frac{\partial C}{\partial z} = 0, \text{ orde kedua dapat diabaikan maka :}$$

$$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} \frac{\partial C}{\partial z} + w_s \frac{\partial C}{\partial z} = 0, \text{ integrasi terhadap z menghasilkan :}$$

$$C w_s + \varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (2.10)$$

Persamaan 2.10 ini merupakan deskripsi matematis profil konsentrasi sedimen suspensi yang dipengaruhi oleh difusi dan kecepatan jatuh . Kecepatan jatuh partikel pada fluida yang jernih (*clear*) dari sebutir partikel pasir yang ukurannya lebih kecil dari 100 μm (*Stokes-range*) dapat digambarkan dengan :

$$w_s = \frac{1}{18} \frac{(s-1)g D_s^2}{\nu} \dots\dots\dots (2.11)$$

Untuk partikel-partikel pasir suspensi berada pada rentang 100 - 1000 μm, berikut ini tipe persamaan yang dapat dipakai sebagaimana yang diajukan oleh Zanke (Van Rijn, 1984).

$$w_s = 10 \frac{\nu}{D_s} \left\{ \left[1 + \frac{0.01(s-1)g D_s^3}{\nu^2} \right]^{0.5} - 1 \right\} \dots\dots\dots (2.12)$$

Untuk partikel-partikel yang lebih besar dari 1000 μm persamaan sederhana berikut dapat digunakan.

$$w_s = 1.1 [(s-1)g D_s]^{0.5} \dots\dots\dots (2.13)$$

Pada persamaan di atas, parameter D_s menggambarkan diameter partikel yang mewakili dari partikel-partikel sedimen suspensi, yang mungkin lebih kecil sekali dari D_{50} dari material dasar (*the bed material*).

Hasil eksperimen dengan kadar konsentrasi sedimen yang tinggi, menunjukkan adanya pengurangan yang besar pada kecepatan jatuh partikel yang diakibatkan adanya partikel-partikel disekitarnya. Untuk kondisi aliran normal dengan rentang partikel antara 50 - 500 μm pengurangan kecepatan jatuh partikel dapat dijelaskan dengan persamaan Richardson-Zaki (Van Rijn, 1984) berikut.

$$w_{s,m} = (1-c)^4 w_s \dots\dots\dots (2.14)$$

dengan $w_{s,m}$ adalah kecepatan jatuh partikel pada suatu campuran antara fluida-sedimen, yang dapat disubstitusikan dengan mengganti w_s pada persamaan 2.10.

Koefisien diffusi yang biasa digunakan adalah diffusi momentum fluida (ϵ_f), yang digambarkan dengan distribusi parabolic melalui seluruh kedalaman aliran (d).

$$\epsilon_f = \frac{z}{d} \left(1 - \frac{z}{d} \right) \kappa u_* d \dots\dots\dots (2.15)$$

Dari hasil analisis suatu distribusi *parabolic-constant*, artinya suatu parabolic berdistribusi dalam setengah bagian bawah dari kedalaman aliran dan suatu nilai konstan dalam setengah bagian atas dari kedalaman aliran, hal ini sering digunakan karena dapat memberikan deskripsi profil konsentrasi sedimen terbaik. Distribusi parabolic-constant ini dapat dibaca dari persamaan berikut (Van Rijn, 1984).

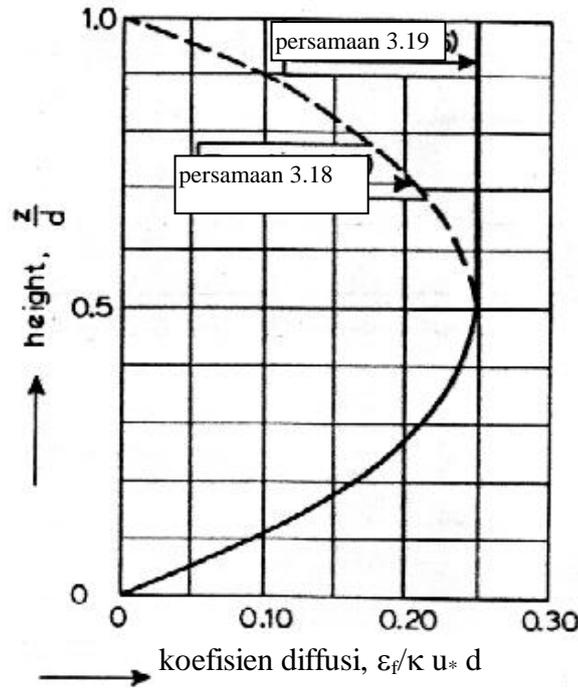
$$\begin{aligned} \epsilon_{f, \max} &= 0.25 \kappa u_* d && \text{untuk } \frac{z}{d} \geq 0.5 \\ \epsilon_f &= 4 \frac{z}{d} \left(1 - \frac{z}{d} \right) \epsilon_{f, \max} && \text{untuk } \frac{z}{d} < 0.5 \end{aligned} \dots\dots\dots (2.16)$$

Persamaan 2.15 dan 2.16 diperlihatkan dalam Gambar 2.4. Hubungan antara Diffusi partikel sedimen (ϵ_s) dengan diffusi momentum fluida dapat diformulasikan sebagai :

$$\epsilon_s = \phi \beta \epsilon_f \dots\dots\dots (2.17)$$

Faktor β menjelaskan perbedaan dalam diffusi partikel sedimen tertentu dan diffusi suatu partikel fluida yang diasumsikan konstan pada seluruh kedalaman. Menurut hasil penelitian Coleman, β dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\beta = \frac{\epsilon_{s, \max}}{\epsilon_{f, \max}} = \frac{\epsilon_{s, \max}}{0.25 \kappa u_* d} \dots\dots\dots(2.18)$$



Gambar 2.4. Koefisien difusi fluida (Van Rijn, 1984).

Beberapa peneliti menyimpulkan bahwa $\beta < 1$ karena partikel-partikel sedimen tidak dapat merespon secara penuh fluktuasi kecepatan turbulen. Alasan lain bahwa pada suatu aliran turbulen gaya sentrifugal dari partikel-partikel sedimen (*density* menjadi lebih tinggi) akan lebih besar dibandingkan pada partikel tersebut, dengan demikian mengakibatkan partikel-partikel sedimen menjadi terlempar keluar pusaran (*eddies*) dengan konsekwensi meningkatnya panjang campur efektif dan laju difusi, dan menghasilkan $\beta > 1$. Untuk damping turbulen (faktor- ϕ) relatif kecil, faktor- β dapat dihitung sebagai :

$$\beta = 1 + 2 \left[\frac{w_s}{u_*} \right]^2, \text{ untuk } 0.1 < w_s / u_* < 1 \dots\dots\dots (2.19)$$

Faktor ϕ (*damping effect*) mengekspresikan damping turbulensi fluida oleh partikel-partikel sedimen dan diasumsikan tergantung pada konsentrasi sedimen lokal. Nilai ϕ terbaik menurut hasil pengukuran profil konsentrasi (Van Rijn, 1984) diberikan oleh:

$$\phi = 1 + \left[\frac{c}{Ca} \right]^{0.8} - 2 \left[\frac{c}{Ca} \right]^{0.4} \dots\dots\dots (2.20)$$

dengan c adalah konsentrasi volumetric lokal dan Ca adalah konsentrasi volumetric dasar/konsentrasi referensi. Jika tanpa pengaruh damping dapat digunakan $\phi = 1$.

G. Teori Aliran Turbulen

Pada dasarnya keadaan atau sifat aliran saluran terbuka ditentukan oleh pengaruh kekentalan/viskositas dan gravitasi sehubungan dengan gaya-gaya inersia aliran. Pengaruh dari kekentalan ini dapat mengakibatkan aliran bersifat laminar, turbulen dan transisi. Aliran bersifat laminar bila gaya kekentalan relatif besar dibandingkan dengan gaya kelembaman/inersia, sehingga pengaruh kekentalan besar terhadap sifat aliran. Dalam aliran laminar partikel-partikel fluida seolah-olah bergerak menurut lintasan tertentu yang teratur atau lurus, dan selapis cairan yang sangat tipis seperti menggelincir di atas lapisan di sebelahnya.

Aliran adalah turbulen bila gaya kekentalan relatif kecil dibandingkan dengan gaya kelembamannya. Pada aliran turbulen partikel-partikel fluida bergerak menurut lintasan yang tidak teratur, tidak lancar dan tidak tetap, walaupun partikel-partikel dalam aliran tersebut secara keseluruhan tetap menunjukkan gerakan maju. Aliran disebut bersifat peralihan (transisi) apabila keadaan alirannya bersifat suatu campuran antara keadaan laminar dan turbulen.

Pengaruh kekentalan terhadap kelembaman dinyatakan dengan Bilangan Reynolds (Re) dan didefinisikan sebagai berikut.

$$Re = \frac{u \cdot L}{\nu} \dots\dots\dots (2.21)$$

dengan u = kecepatan aliran; L = panjang karakteristik (pada saluran terbuka dianggap sama dengan jari-jari hidraulis R) ν = kekentalan kinematik (m^2/det);

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$; μ = kekentalan dinamik dan ρ = rapat massa fluida.

Bila bilangan Reynolds kecil, aliran saluran terbuka bersifat laminar, sebaliknya aliran adalah turbulen jika Re besar. Nilai-nilai berikut merupakan batasan sifat aliran fluida dalam aliran saluran terbuka.

- Re ≤ 500 : aliran la miner
- 500 < Re ≤ 12500 : aliran transisi
- Re > 12500 : aliran turbulen

Karakter aliran turbulen sangat berbeda dengan aliran laminar. Pada aliran turbulen sangat sulit untuk menentukan kecepatan pada suatu titik dalam waktu tertentu. Hal ini disebabkan karena vektor kecepatannya tidak konstan. Kecepatan dan tekanan selalu berfluktuasi terhadap ruang dan waktu. Hanya saja nilai rata-rata dari elemen-elemen fluktuasi ini bisa dihitung.

Komponen fluktuasi kecepatan rata-rata didefinisikan sebagai.

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) dt \dots\dots\dots (2.22)$$

dengan T adalah periode waktu yang diperlukan untuk melakukan pengukuran. Selisih antara kecepatan pada saat t, u(t) atau u_i dengan kecepatan rata-rata, \bar{u} , [|u_i - \bar{u} |], disebut fluktuasi komponen kecepatan (*fluctuating component of the velocity*). Sehingga untuk tiap arah dapat ditulis sebagai berikut.

$$u_i = \bar{u} + u_f ; v_i = \bar{v} + v_f ; w_i = \bar{w} + w_f ; p_i = \bar{p} + p_f \dots\dots\dots (2.23)$$

dengan u_i, v_i, w_i dan u_f, v_f, w_f berturut-turut adalah komponen-komponen kecepatan sesaat dan fluktuasi komponen-komponen kecepatan dalam arah x, y dan z. Sedangkan p_i tekanan sesaat, \bar{p} nilai tekanan rata-rata dan p_f adalah fluktuasi komponen tekanan.

Secara matematik fluktuasi komponen kecepatan diberikan dengan persamaan 2.23 di atas. Jumlah fluktuasi masing-masing adalah nol sehingga.

$$\bar{u}_f = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u_f(t) dt = 0 \dots\dots\dots (2.24.a)$$

$$\bar{v}_f = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v_f(t) dt = 0 \dots\dots\dots (2.24.b)$$

$$\bar{w}_f = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} w_f(t) dt = 0 \dots\dots\dots (2.24.c)$$

$$\overline{p_f} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p_f(t) dt = 0 \dots\dots\dots (2.24.d)$$

meskipun $\overline{u_f} = 0$, tetapi $\overline{u_f u_f} \neq 0$, sehingga :

$$\overline{u_f^2} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u_f(t)^2 dt \neq 0 \dots\dots\dots (2.25.a)$$

$$\overline{v_f^2} \neq 0; \quad \overline{w_f^2} \neq 0; \quad \overline{p_f^2} \neq 0 \dots\dots\dots (2.25.b)$$

Ekspresi bar di atas menunjukkan nilai rata-rata dari masing-masing komponen. Term $\overline{u_f^2}$, $\overline{v_f^2}$, $\overline{w_f^2}$ dan $\overline{p_f^2}$ adalah ukuran besarnya turbulensi aliran atau intensitas turbulen yang merupakan nilai *Root Mean Square* (RMS) dari fluktuasi kecepatan, besarnya intensitas turbulen arah longitudinal u' dan vertikal v' dihitung dengan persamaan berikut.

$$u' = \sqrt{\sum_{i=1}^N (u_i - u)^2 / (N-1)} \quad \text{dan} \quad v' = \sqrt{\sum_{i=1}^N (v_i - v)^2 / (N-1)} \dots\dots\dots (2.26)$$

H. Perhitungan Sedimen Suspensi

Profil distribusi konsentrasi sedimen suspensi $c(y)$ dapat dihitung dengan menggunakan konsep difusi untuk sedimen suspensi sebagaimana diekspresikan dalam persamaan 2.10. Pada kondisi aliran *steady dan uniform* akan terjadi keseimbangan antara butiran sedimen yang bergerak ke bawah yang dipengaruhi gravitasi dan difusi ke atas yang digabungkan dengan fluktuasi turbulen (Zyserman, 1994) dan dapat diekspresikan dalam persamaan berikut.

$$w_s c + \epsilon_s \frac{\partial c}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (2.27)$$

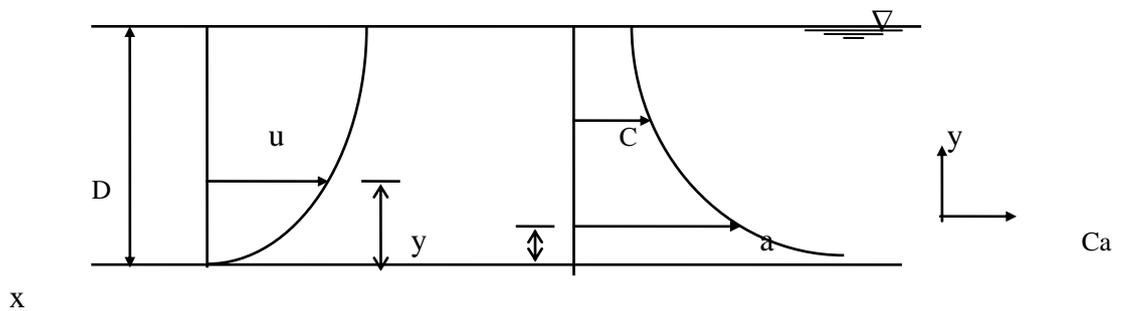
Persamaan differensial ini adalah untuk menghitung distribusi material suspensi pada arah vertikal. Dengan cara mengintegrasikan persamaan tersebut maka dapat diperoleh distribusi relatif. Persamaan 2.27 dapat ditulis sebagai berikut.

$$\frac{dC}{C} = -\frac{w_s}{\epsilon_s} dy \dots\dots\dots (2.28)$$

persamaan ini dapat diintegrasikan antara batas a dan y yang memberikan,

$$\ln \frac{C}{C_a} = -\int_a^y \frac{w_s}{\epsilon_s} dy \dots\dots\dots (2.29)$$

dengan C dan Ca mewakili konsentrasi sedimen suspensi pada jarak y dan a dari dasar (Gambar 2.5).



Gambar 2.5. Ilustrasi definisi profil kecepatan dan konsentrasi.

Ungkapan pada sisi kanan persamaan 2.29 dapat diintegrasikan jika variasi dari w_s dan ϵ_s terhadap y diketahui. Sebagai pendekatan dapat diasumsikan bahwa kedua nilai tersebut dipertahankan konstan terhadap y , sehingga ;

$$\ln \frac{C}{C_a} = -\frac{w_s}{\epsilon_s} (y - a) \text{ atau } \dots\dots\dots (2.30)$$

$$\frac{C}{C_a} = \exp \left\{ -w_s (y - a) / \epsilon_s \right\} \dots\dots\dots (2.31)$$

Cara ini pertama dipakai oleh Schmidh. Sejak hal ini diketahui bahwa koefisien transfer momentum bervariasi terhadap y , asumsi bahwa ϵ_s adalah konstan pada arah vertikal menjadi jelas. Walaupun variasi ϵ_m terhadap y diketahui (untuk aliran air bersih), tetapi variasi ϵ_s terhadap y tidak diketahui. Oleh karena itu hal ini dapat diasumsikan sebagai pendekatan, bahwa ϵ_m dan ϵ_s mempunyai nilai yang sama ($\epsilon_m = \epsilon_s$). Namun Rouse memodifikasi asumsi ini menjadi $\epsilon_m = \beta \epsilon_s$, dengan β adalah faktor proporsional yang nilainya mendekati satu untuk sedimen halus dan cenderung

berkurang dari satu dengan bertambahnya ukuran partikel. Untuk mengevaluasi koefisien transfer momentum ϵ_m , dapat didasarkan pada teori panjang campur (*mixing length*) oleh Prandtl sebagai berikut.

$$\epsilon_m = \tau / \rho_f (du/dy) \dots\dots\dots (2.32)$$

Sedangkan tegangan geser bervariasi secara linier terhadap jarak dari dasarnya.

$$\tau = \tau_o (1 - y/D) ; \text{ dengan } \tau_o = \gamma_f D S \dots\dots\dots (2.33)$$

kombinasikan persamaan (2.32) dan (2.33), ϵ_m dapat diungkapkan sebagai.

$$\epsilon_m = \frac{\tau_o}{\rho_f} \left(\frac{D-y}{D} \right) \frac{1}{du/dy} \dots\dots\dots (2.34)$$

kemudian gradien kecepatan du/dy dapat diperoleh dari hukum kecepatan Karman's untuk saluran terbuka, yaitu :

$$\frac{u - u_{\max}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{D} \dots\dots\dots (2.35)$$

$$\frac{du}{dy} = \frac{u_*}{\kappa} \frac{1}{y} \dots\dots\dots (2.36)$$

u_{\max} adalah kecepatan lokal maksimum dan κ adalah konstanta Karman untuk aliran air bersih (≈ 0.04), kombinasikan persamaan (2.36) dan (2.34) diperoleh :

$$\epsilon_m = u_* \kappa y \left(\frac{D-y}{D} \right) \dots\dots\dots (2.37)$$

asumsikan $\epsilon_m = \epsilon_s$ dan substitusikan persamaan (2.58) kedalam (2.48) diperoleh :

$$\frac{dC}{C} = - \frac{w_s}{u_* \kappa} \frac{D dy}{y(D-y)} \dots\dots\dots (2.38)$$

$$\ln \frac{C}{C_a} = - \frac{w_s}{u_* \kappa} \int_a^y \frac{D dy}{y(D-y)} \dots\dots\dots (2.39)$$

dengan mengambil nilai $z = \frac{w_s}{\kappa u_*} \dots\dots\dots$

(2.40)

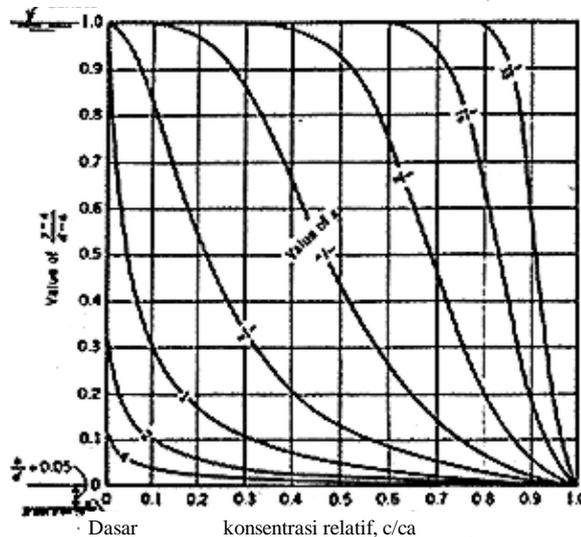
$$\ln \frac{C}{C_a} = z \int_a^y \frac{D dy}{y(D-y)} \Rightarrow \ln \frac{C}{C_a} = \int_a^y d \left[\ln \left(\frac{D-y}{y} \right) \right]^z dy = \ln \left[\left(\frac{D-y}{y} \right) \right]^z$$

$$\ln \frac{C}{C_a} = \ln \left(\frac{D-y}{y} \right) - \ln \left(\frac{D-a}{a} \right) = \ln \left(\frac{\left(\frac{D-y}{y} \right)}{\left(\frac{D-a}{a} \right)} \right) = \ln \left(\frac{D-y}{y} \frac{a}{D-a} \right)^z$$

disederhanakan persamaan tersebut menjadi : $\frac{C}{C_a} = \left(\frac{D-y}{y} \frac{a}{D-a} \right)^z$ atau

$$C = C_a \left(\frac{D-y}{y} \frac{a}{D-a} \right)^z \dots\dots\dots (2.41)$$

Persamaan ini pertama dipublikasikan oleh Rouse, sehingga z sering disebut sebagai parameter Rouse atau *Rouse number*, besarnya parameter tersebut $z = \frac{w_s}{\kappa u_*}$; dengan w_s kecepatan jatuh sedimen suspensi, C konsentrasi sedimen suspensi, C_a konsentrasi referensi pada level $y = a$, y adalah koordinat vertikal yang diukur ke atas dari dasar, D kedalaman air, ϵ_s koefisien difusi untuk sedimen suspensi, u_* kecepatan gesek , β suatu konstanta numerik dan z adalah *parameter Rouse*.



Gambar 2.6. Distribusi konsentrasi sedimen suspensi menurut Rouse (Vanoni, 1977).

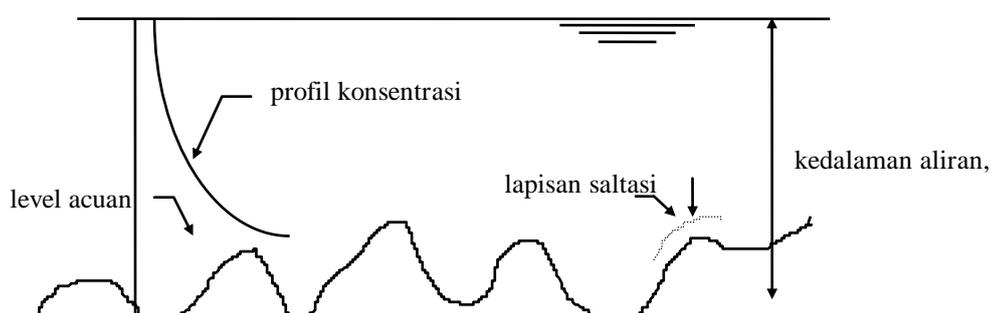
Menurut persamaan 2.41 untuk nilai $y = 0$ yaitu pada dasar saluran, secara matematis persamaan tersebut memberikan nilai C tak terhingga ($C = \infty$), pada kenyataannya hal ini tidaklah mungkin. Bahwa sangat dekat dengan dasar sedimen

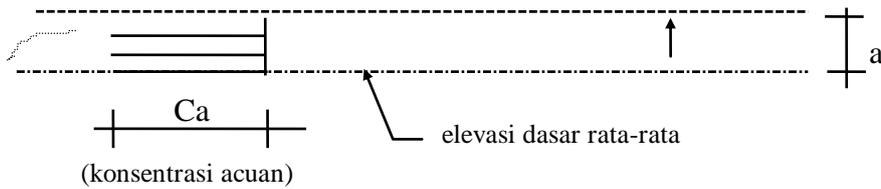
suspensi tidak terdefiniskan, secara fisik dapat dipahami, karena sangat dekat dengan dasar sedimen yang bergerak lebih mencerminkan angkutan sedimen dasar (*bed load*) dari pada angkutan sedimen suspensi (*suspended load*). Hal ini diperkuat dengan pernyataan dari Einstein (1950), bahwa sedimen suspensi tidak mungkin terjadi di daerah yang biasa dikenal sebagai lapisan dasar (*bed layer*), yaitu lapisan yang tebalnya kurang lebih dua kali ukuran butiran.

Pada Gambar 2.6 memperlihatkan grafik persamaan Rouse untuk beberapa nilai eksponen z . Untuk nilai z yang kecil, tampak bahwa distribusi konsentrasi sedimen suspensi cenderung mendekati seragam pada seluruh kedalaman, sedangkan untuk nilai z yang besar, distribusi konsentrasi sedimen suspensi tidak seragam, dimana makin mendekati muka air nilai konsentrasi sedimen suspensi makin rendah dan dekat dasar relatif besar. Mengacu pada persamaan 2.40 terlihat bahwa untuk suatu nilai tegangan geser tertentu, yaitu dalam suatu aliran pada waktu tertentu, z adalah proporsional dengan kecepatan jatuh partikel w_s , sehingga untuk partikel yang kecil akan mempunyai nilai z yang kecil pula dan berdistribusi relatif seragam pada seluruh kedalaman saluran, dan untuk partikel yang mempunyai nilai z besar akan terkonsentrasi dekat dasar.

I. Konsentrasi dan level Acuan (Ca dan a)

Seperti yang telah diuraikan terdahulu, bahwa konsentrasi sedimen suspensi pada dasar ($y = 0$) menurut persamaan Rouse secara matematis nilainya adalah tak terhingga. Pada kondisi riil hal ini tidaklah realistis, yang berarti bahwa persamaan distribusi sedimen suspensi adalah tidak benar pada dasar. Lebih lanjut di dekat dasar konsentrasi sedimen suspensi, material sedimen yang bergerak secara melayang, sulit untuk didefinisikan. Oleh karena itu digunakan pendekatan level acuan (a) dalam hubungannya dengan tinggi bentuk dasar.





Gambar 2.7. Sketsa definisi konsentrasi acuan.

Eksperimen yang dilakukan oleh Balton-Lin (dalam Van Rijn, 1984) menghasilkan persamaan yang terbaik diantara data yang dikumpulkan dalam mengukur dan menghitung profil konsentrasi sedimen suspensi untuk menentukan nilai konsentrasi acuan C_a , yaitu dengan menghasilkan persamaan empiris untuk sebuah nilai konsentrasi reference, yaitu :

$$C_a = 0.015 \frac{D_{50}}{a} \frac{T^{1.5}}{D_*^{0.3}} \dots\dots\dots (2.42)$$

dengan, C_a = konsentrasi acuan dalam term volume partikel solid per satuan volume fluida atau dalam satuan kg/m^3 setelah dikalikan dengan densitas sedimen ρ_s ; D_{50} = diameter partikel material dasar ; T = parameter tingkat angkutan; a = level acuan; D^* = parameter partikel.

$$D^* = D_{50} \left[\frac{(s - 1) g}{\nu^2} \right]^{1/3} \dots\dots\dots (2.43)$$

T adalah parameter karakteristik yang merupakan asumsi dasar dalam menentukan angkutan muatan dasar. Persamaannya dapat ditulis sebagai berikut.

$$T = \frac{(u'_{*c})^2 - (u_{*cr})^2}{(u_{*cr})^2} \dots\dots\dots (2.44)$$

dengan $u'_{*c} = \sqrt{g/C'} \bar{U}$; yaitu kecepatan gesekan pada dasar sehubungan dengan butiran; $C' = 18 \log \frac{12 R_b}{3D_{90}}$; yaitu koefisien Chezy sehubungan dengan butiran; R_b

= jari-jari hidraulik dalam kaitannya dengan dasar; \bar{U} = kecepatan aliran rata-rata; dan u_{*cr} = kecepatan gesekan dasar kritis yang dapat dihitung secara analitis maupun grafis menurut Shield seperti pada Gambar 2.8.

Gambar 2.8 Awal gerak menurut Shields (van Rijn, 1984).

Level acuan diasumsikan sama dengan setengah dari tinggi bentuk dasar (δ) atau ekuivalen dengan tinggi kekasaran (k_s) jika dimensi-dimensi bentuk dasar tidak diketahui. Untuk pertimbangan ketelitian, dapat diambil nilai minimum yaitu $a = 0.01 d$, jadi $a = 0.5 \delta$ atau $a = k_s$; dan $a_{\min} = 0.01 d$.

J. Hipotesis

Karakteristik turbulen untuk aliran yang bermuatan sedimen dapat mempresentasikan partikel-partikel sedimen suspensi kedalam profil distribusi konsentrasi sedimen suspensi pada arah vertikal, dan kehadiran partikel-partikel sedimen suspensi dapat meredam intensitas turbulen terutama pada wilayah dekat dengan dasar, dengan demikian perilaku dinamik dari aliran fluida yang bermuatan sedimen dapat ditampilkan sebagai profil distribusi konsentrasi sedimen suspensi.