

PENGUKURAN DAN PREDIKSI DISTRIBUSI SEDIMEN SUSPENSI PADA SALURAN TERBUKA

Oleh : Rakhmat Yusuf¹⁾ Bambang Agus Kironoto²⁾ dan Adam Pamudji Rahardjo²⁾

ABSTRACT

The suspended sediment distribution in open channels was studied in two ways, i.e.: experimental study, that is carry out direct measurement in recirculating sediment flume in laboratory and numerical approach two dimension uniform turbulent flows, which is set in the mathematics k- ϵ model. For measurement of sediment suspended concentration profiles use optical silt measuring instruments Foslum-probe type and velocity profiles use Programmable Electro Magnetic Liquid Velocity Meter (P-EMS) E-30 type.

Research result of suspended sediment concentration distribution shows that the largest concentration in the area near to the bed, so that the power to maintain the particles stay in the state of suspended is large enough. The presence of suspended sediment particles can reduce of fluid turbulence, indicated by decrease of turbulent intensity especially in the near bed. The limit to distinguish transported particles as bed load and suspended load is noticed by reference level, suspended load stay above the reference level and bed load beneath. The value of reference level according to measurement result is 0.035 H (H = depth of flow). Evaluation of the mean suspended sediment concentration of measurement result (\bar{C}), obtained \bar{C} value for one point measurement is $\bar{C} = C_{0.6H}$ and for two point measurements is $\bar{C} = \frac{1}{2} (C_{0.24H} + C_{0.86H})$, which $C_{0.6H}$, $C_{0.24H}$ and $C_{0.86H}$ is suspended sediment concentration at depth 0.6H, 0.24H and 0.86H from the bed respectively.

Key words: *suspended sediment, open channels, the mathematics k- ϵ model.*

PENGANTAR

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, diperlukan dalam merencanakan, merancang dan mengoperasikan bangunan air dan pembuangan.

Aspek fisik sedimen suspensi terdiri dari partikel-partikel lanau (*silt*) dan lempung (*clay*) yang berada pada suatu ikatan suspensi dalam periode cukup lama, sehingga mengakibatkan kekeruhan pada aliran. Partikel-partikel ini dapat mengendap pada suatu saat sehingga terjadi pendangkalan pada dasar saluran. Oleh karena itu pengetahuan mengenai kuantitas dan karakteristik sedimen suspensi sangatlah penting dalam bidang pengembangan *water resources*. Menurut Coleman (1986) partikel-partikel sedimen suspensi ini berpengaruh pada pengurangan kecepatan pada wilayah dalam, demikian pula ketebalannya. Pengaruh lain dapat mengakibatkan menurunnya kualitas air, yang 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 dan terikat bersama dalam partikel-partikel sedimen yang terangkut.

Transpor muatan sedimen suspensi yang terjadi memerlukan waktu yang relatif lama dalam proses pengendapannya, karena sifatnya yang melayang dalam kurun waktu tertentu akibat efek turbulensi aliran, sehingga sering menimbulkan permasalahan tersendiri dalam pemanfaatan air sungai, maka perlu adanya upaya pengukuran dan prediksi distribusi sedimen suspensi pada saluran.

CARA PENELITIAN

Penelitian ini dikerjakan dalam dua model yaitu studi eksperimental dengan melakukan pengukuran di laboratorium pada flume (pendekatan model fisis) dan pendekatan model matematika aliran turbulen $k-\varepsilon$ yang merupakan aplikasi model turbulen aliran dua dimensi uniform yang dimodifikasikan dengan aliran turbulen bermuatan sedimen (*sediment laden flow*), sehingga dinamika aliran ini dapat divisualisasikan dalam profil konsentrasi sedimen suspensi.

Variabel-variabel yang diukur dalam studi eksperimental di flume dikategorikan kedalam tiga kelompok, yaitu pengukuran distribusi konsentrasi sedimen suspensi, pengukuran distribusi kecepatan dan pengukuran-pengukuran variabel lain (kekasaran dasar, kedalaman aliran dan kemiringan dasar saluran).

Peralatan yang dipakai untuk mengukur konsentrasi sedimen suspensi menggunakan instrumen pengukuran optik tipe *Foslim*, instrumen ini mengukur partikel-partikel lanau (*silt*) dalam suspensi. Metoda pengukuran didasarkan pada prinsip penipisan intensitas sinar (*light attenuation*), yang diakibatkan oleh terserapnya cahaya dan penyebaran partikel-partikel lanau, dan penipisan intensitas ini adalah merupakan suatu fungsi konsentrasi lanau. Pengukuran profil kecepatan tampang arah vertikal pada aliran seragam dilakukan dengan menggunakan *Programmable Electro Magnetic Liquid Velocity Meter (P-EMS)*. Data kecepatan yang diukur adalah kecepatan titik pada tampang arah vertikal.

Pengukuran variabel lainnya seperti kekasaran dasar (k_s), dilakukan dengan analisa butiran material dasar yang digunakan (*bed material*), sebagaimana yang dikemukakan dalam konsep kekasaran permukaan *equivalent sand roughness* dari Nikuradse, yang menghubungkan nilai k_s dengan ukuran partikel. Untuk kasus ini kekasaran dasar k_s dapat didekati dengan besaran parameter partikel, yaitu $k_s = 3D_{90}$ (van Rijn: 1984). Pengukuran kedalaman aliran dilakukan dengan mengukur langsung kedalaman aliran yang diamati di flume menggunakan *point meter*, diukur setelah kondisi aliran *uniform* dan stabil.

Pembacaan dan perolehan data dilakukan dengan *Data Acquisition (DAQ system)*, yang terdiri dari pendekatan *virtual instrumentation (VI, baca : 'vee eye')* yang memerlukan *DAQ board* (dipakai seri Lab-PC-1200/AI), sebuah komputer yang telah diinstall dengan LabVIEW dan *driver software* NIDAQ serta beberapa metode penyambungan dari *signal transducer* ke *board*. DAQ adalah suatu proses penyederhanaan untuk mengukur suatu signal

nyata yang ada di muka bumi ini, seperti suatu voltage, yang membawa informasi kedalam komputer untuk diproses, dianalisis, disimpan atau bentuk-bentuk manipulasi data lainnya. Dari fenomena fisik yang ada, signal akan diukur seperti kecepatan, temperatur, kelembaban, tekanan, kecepatan aliran, pH, radioactivity, intensitas cahaya dan sebagainya (Wells, L.K., and Travis, J., 1997).

Persamaan matematis (model matematika k-ε) yang menggambarkan aliran turbulen dua dimensi dalam bentuk diferensial parsial diselesaikan secara numeris dengan metoda beda hingga, persamaan tersebut adalah sebagai berikut.

Persamaan momentum :

$$\frac{\partial}{\partial x}(u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(uv) = \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial y} \right) + gS_0 - g \frac{dD}{dx} \dots\dots\dots (1)$$

Persamaan transport :

$$\frac{\partial}{\partial x}(uk) + \frac{\partial}{\partial y}(vk) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + G - \varepsilon \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(u\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial y}(v\varepsilon) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{dengan } G = v_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (4)$$

Bentuk persamaan (1), (2) dan (3) di atas adalah serupa, sehingga dapat ditulis dalam suatu bentuk persamaan tunggal (Kironoto, B.A., 1994) yaitu sebagai berikut.

$$\frac{\partial}{\partial x}(u\phi) + \frac{\partial}{\partial y}(v\phi) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_\phi \dots\dots\dots (5)$$

$$(1) \quad (2) \quad (3) \quad (4)$$

Persamaan tunggal ini dapat mewakili ketiga persamaan di atas untuk masing-masing parameter u, k dan ε.

Untuk parameter u, jika $\phi = u$; $\Gamma_\phi = v_t$ dan $S_\phi = gS_0 - g dD/dx$
(6)

Untuk parameter k, jika $\phi = k$; $\Gamma_\phi = v_t/\sigma_k$ dan $S_\phi = G - \varepsilon$
(7)

Untuk parameter ε, jika $\phi = \varepsilon$; $\Gamma_\phi = v_t/\sigma_\varepsilon$ dan $S_\phi = C_1 \varepsilon/k G - C_2 \varepsilon^2/k$ (8)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Partikel-partikel sedimen suspensi yang representatif dihitung dari hasil analisa butiran (*grain size analysis*) untuk material dasar (*bed material*), diperoleh rapat massa 2.57 gr/cm^3 dan ukuran partikel yaitu; $d_{16} = 0.016 \text{ cm}$, $d_{35} = 0.036 \text{ cm}$, $d_{50} = 0.048 \text{ cm}$, $d_{84} = 0.125 \text{ cm}$, dan $d_{90} = 0.14 \text{ cm}$. Besarnya diameter partikel sedimen suspensi yang representatif (D_s) menurut pendekatan Einstein mempunyai korelasi dengan d_{50} dan koefisien σ_s (standar deviasi geometrik), dihitung $\sigma_s = 0.5(d_{84}/d_{50} + d_{50}/d_{16}) = 2.802$, nilai D_s akan bervariasi tergantung kepada kondisi alirannya, dapat dievaluasi dari besarnya nilai parameter T (*transport stage parameter*) yang berubah-ubah, besarnya nilai D_s dihitung dengan persamaan $D_s = d_{50} \{1 + 0.011(\sigma_s - 1)(T-25)\}$, untuk beberapa kondisi aliran yang diteliti diperoleh rentang nilai D_s bervariasi antara $0.0246 - 0.0363 \text{ cm}$, sehingga jelas bahwa diameter partikel suspensi akan lebih kecil dari partikel material dasar.

A. Profil Kecepatan

Pada seri aliran RUN 3-1 (Gambar 1a) dengan nilai *aspect ratio* $b/H < 5$, pada permukaan terjadi penyimpangan yang menyolok akibat adanya pengaruh dinding. Pada gambar menunjukkan bahwa debit semakin besar maka distribusi profil kecepatan semakin tidak seragam, implikasinya bahwa debit semakin besar maka angkutan sedimen suspensi akan semakin bertambah dan menyebabkan distribusi kecepatan tidak seragam sebagaimana pada *clear water*.

Kecepatan gesek dasar u_* dapat dihitung dengan menggunakan Metode Clauser memanfaatkan nilai kecepatan rata-rata titik hasil pengukuran (pada profil kecepatan) bersama-sama dengan persamaan distribusi kecepatan logaritmis (*log-law*) $u/u_* = 1/\kappa \ln (y/k_s) + Br$, yang berlaku pada wilayah dalam (*inner region* dengan batasan $y/d \leq 0.2$), seperti pada tabel 1. Perhitungan dibandingkan dengan *Energy-Gradient method*, $u_{*eg} = (g H Se)^{0.5}$, Se adalah kemiringan garis energi (*energy slope*), dan diambil sama dengan kemiringan dasar saluran (So).

Hasil perhitungan u_{*eg} pada umumnya memperlihatkan nilai kesalahan yang besar terhadap u_* hasil hitungan metode Clauser, implikasinya bahwa perkiraan Se sama dengan So adalah kurang tepat untuk beberapa kasus seri aliran, karena pada dasar saluran dalam penelitian ini merupakan material yang mudah berubah seperti mengalami degradasi dan aggradasi serta perubahan konfigurasi dasar akibat alirannya, maka kemungkinan besar garis kemiringan energi tidak akan sama dengan kemiringan dasar saluran.

B. Konsentrasi Sedimen Suspensi

Konsentrasi sedimen suspensi pada wilayah dekat dasar lebih besar bila dibandingkan dengan konsentrasi di permukaan (Gambar 2). Pada wilayah dekat dasar energi per satuan waktu (*daya*) yang diperlukan untuk mempertahankan partikel-partikel agar

senantiasa berada dalam kondisi tersuspensi cukup besar. Dapat dipahami dari profil distribusi kecepatan hasil pengukuran tampak bahwa pada wilayah dasar kecepatan adalah minimum, sehingga pada wilayah ini kecepatan endap partikel-partikel akan besar bila dibandingkan dengan gaya yang diperlukan untuk menggerakkan partikel-partikel agar tersuspensi, sebagai konsekwensinya pada wilayah ini akan banyak terakumulasi partikel-partikel terutama yang berukuran lebih besar dari partikel tersuspensi pada bagian atas, sehingga kuantitas konsentrasi sedimen suspensi akan lebih besar pada wilayah dasar. Pada bagian permukaan aliran, kecepatan adalah maksimum, dan partikel-partikel yang berada pada zona tampang bagian atas biasanya partikel yang berukuran lebih kecil dibandingkan dengan di wilayah dasar, sehingga kecepatan endap partikel menjadi kecil dan gaya untuk menggerakkan dan mengangkat partikel pada zona ini lebih besar, sehingga partikel senantiasa tersuspensi sepanjang aliran dan kuantitas konsentrasi sedimen suspensi relatif kecil.

Pada posisi dasar batas untuk menentukan bahwa kondisi angkutan itu *bed load* dan *suspended load* agak sulit. Seperti diungkapkan oleh 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. Namun pendekatan Einstein ini menjadi kurang akurat bila dasar saluran membentuk formasi tertentu, oleh karena itu van Rijn (1984) dari hasil penelitiannya mengajukan level acuan (*reference level*) minimum sebesar $a = 0.01H$ atau $a = k_s$, pada kondisi level acuan ini *bed load* berada dan sekaligus merupakan sumber terjadinya *suspended load*, sehingga konsentrasi disini dikatakan sebagai konsentrasi acuan (*reference of concentration-Ca*).

Level acuan dihitung dari data-data hasil pengukuran di laboratorium menurut persamaan $\ln \frac{C}{C_a} = -w_s / \varepsilon_s (y - a)$ dengan koefisien difusi (ε_s) bervariasi terhadap kedalaman (Gambar 4), sebagaimana diungkapkan oleh Lane dan Kalinske dalam persamaan $\varepsilon_s = u_* \kappa \frac{y}{H} (H - y)$ dan hasilnya disajikan pada tabel 2. Selanjutnya level acuan a , dapat didekati dari hasil rata-rata perhitungan sebesar $0.035 H$ (H adalah kedalaman aliran). Nilai ini lebih besar dari nilai minimum yang disyaratkan oleh van Rijn, yaitu $a = 0.01 H$, sehingga nilai level acuan ini dapat digunakan untuk kondisi aliran uniform bermuatan sedimen.

Penentuan nilai konsentrasi sedimen suspensi rata-rata \bar{C} pada tampang sangat diperlukan untuk kebutuhan pengukuran berikutnya, evaluasi data hasil eksperimen guna memperoleh nilai \bar{C} dihitung dengan formulasi $\bar{C} = A/H$ untuk setiap seri aliran, A adalah luas areal di bawah kurva distribusi konsentrasi sedimen suspensi hasil pengukuran. Nilai A dapat dihitung dengan mengintegrasikan luasan masing-masing pias yang ada di bawah kurva tersebut, secara matematis formulasinya dapat ditulis dalam bentuk integral

$$A = 1/2 \int_a^H (c_{=a} + c_{=H}) dH \text{ atau } A = 1/2 (H - a)(c_{=a} + c_{=H}).$$
 Nilai \bar{C} dibandingkan dengan metode *Straub*, yaitu $\bar{C}_s = (5/8 C_{0.2H} + 3/8 C_{0.8H})$ (Bogardi, 1978 : 424) seperti pada tabel 3, dengan $C_{0.2H}$ dan $C_{0.8H}$ adalah konsentrasi sedimen suspensi pada kedalaman 0.2H dan 0.8H dari dasar saluran.

Dari tabel 4 diperoleh nilai rata-rata untuk pengukuran satu titik adalah pada $\bar{C} = C_{0.6H}$, sedangkan penentuan posisi pengukuran untuk dua titik adalah $\bar{C} = 1/2 (C_{0.24H} + C_{0.86H})$, dengan $C_{0.24H}$ dan $C_{0.86H}$ berturut-turut adalah konsentrasi sedimen suspensi pada kedalaman 0.24 H dan 0.86 H dari dasar.

C. Intensitas Turbulen

Pergerakan sedimen suspensi pada suatu tampang aliran, dipengaruhi oleh komponen fluktuasi kecepatan arah vertikal. Suatu partikel akan tersuspensi karena adanya turbulensi aliran, baik pada arah longitudinal maupun vertikal. Fluktuasi kecepatan arah vertikal menyebabkan kuantitas konsentrasi sedimen suspensi pada arah vertikal tidak seragam, Intensitas turbulen merupakan *Root Mean Square* nilai fluktuasi kecepatannya, intensitas turbulen arah longitudinal adalah *Root Mean Square* (RMS) nilai fluktuasi kecepatan pada arah horizontal, dirumuskan sebagai $u' = \sqrt{\sum_{i=1}^N (u_i - u)^2 / (N - 1)}$. Intensitas turbulen hasil pengukuran dibandingkan dengan persamaan yang telah ada hasil penelitian, diantaranya yang dikemukakan oleh Nezu and Rodi (1986) ; $\frac{u'}{u_*'} = 2.26 e^{-0.88 y/\delta}$ yang berlaku untuk batas halus dan kasar (*smooth and rough boundaries*), hasil penelitian yang dikemukakan oleh Kironoto, B.A. (1993) memberikan persamaan intensitas turbulen untuk batas kasar (*rough boundaries*) dengan dasar *fix bed* pada aliran air jernih adalah $\frac{u'}{u_*'} = 2.04 e^{-0.97 y/\delta}$, kedua persamaan pembanding tersebut seperti tertera pada Gambar 3 yang menunjukkan bahwa sebagian besar data hasil pengukuran berada di atas kedua persamaan pembanding tersebut, kecuali pada seri aliran dengan debit kecil pada RUN 1 berada di bawah kedua persamaan pembanding. Keberadaan intensitas turbulen yang kecil ini mempunyai korelasi dengan distribusi konsentrasi sedimen suspensi, sebagaimana terlihat pada Gambar2 (a) bahwa pada seri aliran RUN 1 distribusi sedimen suspensi lebih seragam dibandingkan dengan seri aliran lainnya. Nezu (dalam Kironoto,BA., 1993) mengungkapkan bahwa untuk aliran seragam pada saluran terbuka, intensitas turbulen adalah berdistribusi eksponensial yang diekspresikan dalam bentuk $\frac{u'}{u_*'} = D_1 e^{-\lambda_1 y/\delta}$, dari data pengukuran yang terkumpul maka diperoleh

konstanta eksperimen $D_1 = 1.05$ dan $\lambda_1 = 1.29$, sehingga persamaan intensitas turbulen untuk aliran bermuatan sedimen dengan dasar bergerak (*movable bed*) menjadi $\frac{u'}{u_*} = 1.05 e^{-1.29 y/\delta}$ dengan koefisien korelasi $r = 0.82$. Hasil pengukuran intensitas turbulensi ini relatif lebih besar dibandingkan dengan formulasi perbandingan, karena dalam pengukuran dengan dasar yang bergerak maka nilai kekasaran dasar k_s akan berubah selama pengamatan, k_s bisa berubah menjadi lebih besar, lebih kecil atau tetap tergantung pada kondisi alirannya.

D. Koefisien Diffusi Sedimen Suspensi

Hasil pengukuran konsentrasi sedimen suspensi dapat diaplikasikan kedalam bentuk persamaan matematis untuk profil konsentrasi sedimen suspensi yang dipengaruhi oleh diffusi, persamaan $w_s C + \varepsilon_s \frac{dC}{dy} = 0$ dapat dipakai untuk mengevaluasi koefisien diffusi. Nilai dC/dy dapat diperoleh dari profil konsentrasi sedimen suspensi hasil pengukuran dengan teknik *fitting curve*, profil distribusi koefisien diffusi seperti pada Gambar 4.

E. Pengaruh Damping

Untuk mengetahui sampai sejauh mana kehadiran partikel-partikel sedimen suspensi berpengaruh terhadap redaman turbulensi fluida, dapat diketahui dari besarnya nilai *damping effect* (ϕ), yang tergantung kepada nilai konsentrasi sedimen suspensi lokal, nilai ϕ dihitung dari hasil pengukuran konsentrasi sedimen suspensi dengan formula $\phi = 1 + [c/Ca]^{0.8} - 2[c/Ca]^{0.4}$ (Van Rijn, 1984). Gambar 5 mengungkapkan bahwa kehadiran partikel-partikel sedimen suspensi berpengaruh terhadap turbulensi fluida, yaitu dengan mengamati nilai $\phi < 1$ untuk setiap seri aliran, gejala ini menunjukkan bahwa telah terjadi redaman pada fluida akibat hadirnya partikel-partikel pada aliran yang bermuatan sedimen.

F. Perbandingan Hasil Pengukuran

Hasil pengukuran distribusi kecepatan dan distribusi konsentrasi sedimen suspensi dibandingkan dengan hasil hitungan model aliran turbulen $k-\varepsilon$ seperti pada Gambar 6 dan Gambar 7. Pada gambar tersebut memperlihatkan nilai kedekatan dengan hasil pengukuran untuk beberapa seri running aliran, untuk RUN 3-1 mempunyai kesamaan antara hasil pengukuran dengan perhitungan model aliran $k-\varepsilon$ serta distribusi Rouse. Pada perhitungan profil distribusi sedimen suspensi dengan model $k-\varepsilon$, parameter yang berubah adalah level acuan dan kekasaran dasar k_s , sehingga penentuan besarnya ditempuh dengan cara coba-coba sampai diperoleh nilai mendekati hasil pengukuran. Rata-rata nilai k_s hasil model $k-\varepsilon$ bila dikorelasikan terhadap ukuran butiran material dasar, diperoleh $k_s = 6d_{35}$, $k_s = 4.6d_{50}$, $k_s =$

$1.77d_{84}$ dan $k_s = 1.6d_{90}$. Van Rijn (1984) menetapkan nilai $k_s = 3d_{90}$ dan Kamphuis $k_s = 2.5 d_{90}$.

G. Transport Sedimen Suspensi

Transport sedimen suspensi (Q_{ss}) diperoleh dengan integrasi hasil perkalian antara konsentrasi sedimen suspensi dan kecepatan aliran pada titik-titik pengukuran (lokal), mulai dari level acuan a hingga ke permukaan dengan persamaan $Q_{ss} = \int_a^y u(y) c(y) dy$, dengan demikian Q_{ss} merupakan transport sedimen suspensi total pada tampang yang ditinjau. Pada Gambar 8 menunjukkan bahwa Q_{ss} konstan pada jarak ± 800 cm dari hulu, artinya bahwa aliran sudah mencapai kondisi berkembang penuh (*full developed flow*).

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

1. Pada wilayah dekat dasar saluran konsentrasi sedimen suspensi lebih besar dibandingkan dengan di permukaan. Keberadaan konsentrasi yang tinggi di dekat dasar dapat menekan perkembangan turbulensi, sehingga turbulensi maksimum dapat terjadi di luar dari wilayah dalam (*inner region*).
2. Batas perbedaan antara angkutan ditranspor sebagai sedimen suspensi (*suspended load*) dengan angkutan dasar (*bed load*) ditetapkan nilai level acuan a , didekati dengan $a = 0.035 H$ untuk aliran bersedimen uniform. Angkutan di bawah a adalah *bed load* dan di atasnya adalah *suspended load*.
3. Konsentrasi sedimen suspensi rata-rata pada saluran terbuka aliran uniform dapat dilakukan pengukuran satu titik yaitu $\bar{C} = C_{0.6H}$, dan untuk pengukuran dua titik dihitung dengan $\bar{C} = 1/2 (C_{0.24H} + C_{0.86H})$, dengan H , $C_{0.6H}$, $C_{0.24H}$ dan $C_{0.86H}$ adalah kedalaman aliran, nilai konsentrasi sedimen suspensi pada kedalaman 0.6 H, 0.24 H dan 0.86 H dari dasar saluran.
4. Hadirnya partikel-partikel sedimen suspensi pada aliran bermuatan sedimen mengakibatkan terjadinya redaman atau damping pada turbulensi fluida oleh partikel-partikel tersebut.
5. Profil distribusi konsentrasi sedimen suspensi dan profil distribusi kecepatan pada model aliran turbulen k-e dapat disesuaikan dengan hasil pengukuran dengan mengatur parameter level acuan a dan kekasaran dasar k_s , yang memberikan hasil simulasi model k-e dengan hasil pengukuran cukup baik.
6. Nilai kekasaran dasar k_s untuk material dasar bergerak dapat didekati dengan $k_s = 1.6 d_{90}$.

B. Saran

1. Prediksi transport sedimen suspensi untuk aliran non-uniform yang sering terjadi di sungai-sungai perlu diteliti lebih lanjut. Penelitian dapat dilakukan di flume dengan karakter aliran non-uniform (percepatan atau perlambatan).
2. Perlu kajian lebih lanjut mengenai sebaran diameter partikel sedimen suspensi untuk beberapa zona tampang vertikal tertentu, sebab hal ini akan menimbulkan perbedaan dalam menafsirkan kecepatan jatuh partikel, sehingga hasilnya akan diperoleh range kecepatan jatuh yang lebih teliti.
3. Pengukuran dan pengkajian konsentrasi sedimen suspensi dengan material dasar tetap (*fix bed*) perlu dilakukan, pengaruhnya dapat dibandingkan dengan *movable bed* untuk setiap parameter penting, misalnya intensitas turbulen, profil distribusi konsentrasi sedimen suspensi dan lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Bogardi, J., 1978, ***Sediment Transport In Alluvial Streams***, Akademiai Kiado, Budapest, Hungary.
- Coleman, N.L., 1986, ***Effects of Suspended Sediment on the Open-Channel Velocity Distribution***, Water Resources Research, Vol. 22, No. 10.
- Garde, R.J., and Ranga Raju, K.G., 1977, ***Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Streams Problems***, Wiley Eastern Limited, New Delhi.
- Einstein, H.A., 1950, ***The Bed-load Function for Sediment Transport in Open Channel Flow***, Tech. Bull. No. 1026, U.S. Dept. of Agriculture, Washington, D.C.
- Kironoto, B.A., 1993, ***Turbulence Characteristic of Uniform and Non-uniform, Rough Open Channel Flow***, Doctoral Disertation, No. 1094, Ecole Polytechnique Federale, Lausanne, Switzerland.
- Kironoto, B.A., 1994, ***Model Matematika $k-\epsilon$ Untuk Aliran Turbulen Dalam Saluran Terbuka***, Laporan Penelitian, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Lau, Y.L., 1983, ***Suspended Sediment Effect on Flow Resistance***, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 109, No. 5, ASCE.
- Nezu, I. and Rodi W., 1986, ***Open Channel Flow Measurements with a Laser Doppler Anemometer***, J. Hydr. Engrg., ASCE, 112(5), 335-355.
- Van Rijn, L.C., 1984, ***Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport***, Journal of Hydraulics Engineering, Vol. 110, No. 11, ASCE.
- Wang, Z. and Larsen, P., 1994, ***Turbulent Structure of Water and Clay Suspensions With Bed Load***, Journal of Hydraulics Engineering, Vol. 120, No. 5, ASCE.
- Wells, L.K. and Travis, J., 1997, ***LabVIEW for Everyone, Graphical Programming Made Even Easier***, Prentice Hall PTR, United States of America.
- Zyserman, J.A. and Fredsoe, J., 1994, ***Data Analysis of Bed Concentration of Suspended Sediment***, Journal of Hydraulics Engineering, Vol. 120, No. 9, ASCE.

¹⁾ Staf Pengajar Program Studi Teknik Sipil FPTK-UPI Bandung

²⁾ Staf Pengajar Program Studi Teknik Sipil Program Pascasarjana UGM-Yogyakarta.

Kepada Yth.,
Pimpinan Redaksi Jurnal Sipil Soepra

Jurusan Teknik Sipil-Fakultas Teknik
UNIKA SOEGIJAPRANATA
Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 Bendan Duwur
Semarang 50234

Pengirim :
Rakhmat Yusuf, MT.
Jl. Cikutra Barat No. 12
Bandung 40191