

PENGUKURAN DAN PREDIKSI DISTRIBUSI SEDIMEN SUSPENSI PADA SALURAN TERBUKA

1. 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).
- Sedimen suspensi terdiri dari partikel-partikel lanau (*silt*) dan lempung (*clay*) berada dalam ikatan suspensi dalam periode yang cukup lama.
- Transpor muatan sedimen suspensi memerlukan waktu yang relatif lama dalam proses pengendapannya.

B. Perumusan Masalah

- Distribusi partikel sedimen suspensi dipengaruhi oleh fluktuasi turbulensi aliran,
- Profil distribusi konsentrasi sedimen suspensi pada suatu tampang vertikal dapat digunakan pendekatan model aliran turbulen.

C. Tujuan Penelitian

- Mengukur dan memprediksi distribusi sedimen suspensi serta distribusi kecepatan pada arah vertikal penampang saluran.
- Mengetahui pengaruh turbulensi aliran pada penyebaran konsentrasi partikel-partikel sedimen suspensi.
- Membandingkan antara hasil pengukuran profil distribusi konsentrasi sedimen suspensi dan profil distribusi kecepatan yang diperoleh dari hasil pengukuran (laboratorium) dengan model matematika aliran turbulen $k-\epsilon$.

D. Manfaat yang Diharapkan

- Menghitung sejumlah sedimen suspensi yang ditranspor oleh air pada kedalaman tertentu.
- Dapat mengetahui pada wilayah mana akumulasi partikel-partikel sedimen suspensi berada.
- Dapat mengaplikasikan model aliran turbulen $k-\epsilon$ yang telah dimodifikasi dalam menyelesaikan masalah transport polutan.

II. LANDASAN TEORI

A. Profil Konsentrasi Sedimen Suspensi

- Mekanisme penyebab sedimen diangkut dalam aliran air adalah kecepatan fluida, tegangan geser dan tegangan normal yang dihasilkan dari turbulensi aliran.
- Pengaruh kecepatan fluida dan turbulensi aliran pada transpor sedimen adalah dominan bila sedimen terdiri dari partikel-partikel halus.
- Bhattacharya *et al.* (1992) memakai persamaan konservasi massa dan momentum untuk air dan sedimen bersama-sama dengan tegangan turbulen yang digunakan untuk menurunkan profil konsentrasi sedimen. Nilai χ_2 (sama dengan konstanta Von Karman tetapi untuk partikel sedimen) dipengaruhi secara langsung oleh parameter kemiringan profil konsentrasi pada bidang referensi (C_o'), konstanta Von Karman (χ) dan jarak di atas dasar (y_o) dimana $C = C_o$.
- Model turbulen pada sedimen dapat dipertimbangkan sama dengan model turbulen pada fluida dalam faktor panjang campur; serta konsep panjang campur untuk sedimen sama dengan panjang campur untuk fluida (air).

B. Model Matematika Aliran Turbulen k- ϵ

- Karakteristik sedimen suspensi sangat dipengaruhi oleh adanya turbulensi aliran, suatu model matematika k- ϵ untuk memprediksi aliran turbulen pada saluran terbuka tanpa sedimen untuk kondisi aliran steady-uniform dua dimensi telah digunakan oleh Kironoto, B.A. (1994),
- Model matematika aliran turbulen k- ϵ dimodifikasi dengan aliran yang bermuatan sedimen untuk memprediksi distribusi sedimen suspensi. Agar persamaan ini dapat diselesaikan diperlukan persamaan pendukung yang menyatakan hubungan antara energi kinetik (k) dengan energi disipasi (ϵ), sehingga model ini lebih dikenal sebagai model matematika k- ϵ .

C. Pengaruh Sedimen Suspensi Pada Distribusi Kecepatan

- Coleman (1986) menyatakan bahwa pengaruh sedimen suspensi pada distribusi kecepatan menyebabkan ketebalan wilayah logaritmik berkurang dengan adanya sedimen suspensi bila dibandingkan dengan aliran air jernih, yang ditunjukkan dengan berkurangnya nilai $u_* L/v_L$ untuk kapasitas suspensi.

D. Gerakan Sedimen Suspensi

- 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.

- 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.

E. 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 :

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

- 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 :

$$\frac{u_{*cr}}{W_s} = 1 \dots\dots\dots (2.2)$$

dan dapat dinyatakan sebagai :

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

yang dapat dihitung berdasarkan pada grafik Shields.

- Studi eksperimental di Laboratorium Hidraulik Delf oleh Leo Van Rijn menentukan kondisi aliran kritik dari partikel-partikel sedimen pada pergerakan turbulen, hasil eksperimentalnya adalah :

$$\frac{u_{*cr}}{W_s} = \frac{4}{D^*} \quad \text{untuk} \quad 1 < D^* < 10 \dots\dots\dots (2.4)$$

$$\frac{u_{*cr}}{W_s} = 0.4 \quad \text{untuk} \quad D^* > 10 \dots\dots\dots (2.5)$$

$$D^* = D_{50} \left[\frac{(s-1)g}{\nu^2} \right]^{1/3} \dots\dots\dots (2.6)$$

dengan D^* = parameter partikel; D_{50} = diameter partikel material dasar; s = spesifik density; ν = viskositas kinematik; W_s = kecepatan jatuh partikel.

F. Persamaan Umum Diffusi

Persamaan umum diffusi yang biasa digunakan adalah :

$$Cw_s + \epsilon_s \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (2.7)$$

Persamaan 2.7 ini merupakan deskripsi matematis profil konsentrasi sedimen suspensi yang dipengaruhi oleh diffusi dan kecepatan jatuh .

G. Teori Aliran Turbulen

- Sifat aliran saluran terbuka ditentukan oleh pengaruh kekentalan/viskositas dan gravitasi (gaya-gaya inersia aliran).
- Pengaruh kekentalan terhadap kelembaman dinyatakan dengan Bilangan Reynolds (Re).

$$Re = \frac{u.L}{\nu} \dots\dots\dots (2.8)$$

L = panjang karakteristik (pada saluran terbuka dianggap sama dengan jari-jari hidraulis R).

- Nilai-nilai berikut merupakan batasan sifat aliran fluida dalam aliran saluran terbuka, yaitu jika $Re \leq 500$: aliran laminar, $500 < Re < 12500$: aliran transisi dan jika $Re > 12500$: aliran tubulen.

H. Perhitungan Sedimen Suspensi

- Profil distribusi konsentrasi sedimen suspensi $c(y)$ arah vertikal dihitung dengan menggunakan konsep diffusi untuk sedimen suspensi.

$$w_s c + \epsilon_s \frac{\partial c}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (2.9)$$

- Integrasikan persamaan tersebut maka dapat diperoleh distribusi relatif.

$$\frac{dC}{C} = - \frac{w_s}{\epsilon_s} dy \dots\dots\dots (2.10)$$

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

$$\ln \frac{C}{C_a} = - \int_a^y \frac{w_s}{\epsilon_s} dy \dots\dots\dots (2.11)$$

Ungkapan pada sisi kanan persamaan 2.11 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 ;

$$\ln \frac{C}{C_a} = -\frac{w_s}{\epsilon_s} (y-a) \text{ atau } \dots \dots \dots (2.12)$$

$$\frac{C}{C_a} = \exp \left\{ -w_s (y-a) / \epsilon_s \right\} \dots \dots \dots (2.13)$$

- Asumsi yang diajukan Rouse $\epsilon_m = \beta \epsilon_s$, untuk mengevaluasi koefisien transfer momentum ϵ_m , dapat didasarkan pada teori panjang campur (*mixing length*) oleh Prandtl sebagai berikut.

$$\epsilon_m = \tau / \rho_f (du/dy) \dots \dots \dots (2.14)$$

- Sedangkan tegangan geser bervariasi secara linier terhadap jarak dari dasarnya.

$$\tau = \tau_o (1 - y/D); \text{ dengan } \tau_o = \gamma_f D S \dots \dots \dots (2.15)$$

- kombinasikan persamaan (2.14) dan (2.15), ϵ_m dapat diungkapkan sebagai.

$$\epsilon_m = \frac{\tau_o}{\rho_f} \left(\frac{D-y}{D} \right) \frac{1}{du/dy} \dots \dots \dots (2.16)$$

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

$$\frac{u - u_{\max}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{D} \dots \dots \dots (2.17)$$

$$\frac{du}{dy} = \frac{u_*}{\kappa y} \dots \dots \dots (2.18)$$

u_{\max} adalah kecepatan lokal maksimum dan κ adalah konstanta Karman untuk aliran air bersih (≈ 0.4), kombinasikan persamaan (2.18) dan (2.16) diperoleh :

$$\epsilon_m = u_* \kappa y \left(\frac{D-y}{D} \right) \dots \dots \dots (2.19)$$

asumsikan $\epsilon_m = \epsilon_s$ dan substitusikan persamaan (2.19) kedalam (2.9) diperoleh :

$$\frac{dC}{C} = -\frac{w_s}{u_* \kappa} \frac{D dy}{y(D-y)} \dots \dots \dots (2.20)$$

$$\ln \frac{C}{C_a} = -\frac{w_s}{u_* \kappa} \int_a^y \frac{D dy}{y(D-y)} \dots \dots \dots (2.21)$$

dengan mengambil nilai $z = \frac{w_s}{\kappa u_*}$ (2.22)

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

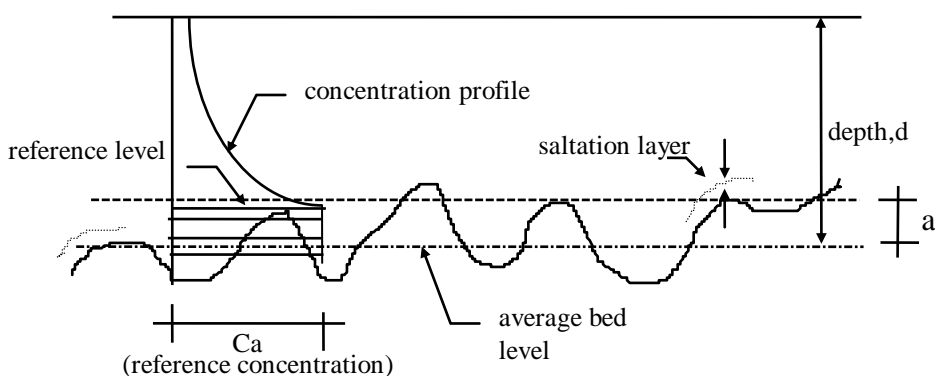
disederhanakan persamaan tersebut menjadi : $\frac{C}{C_a} = \left(\frac{D-y}{y} \frac{a}{D-a} \right)^z$ atau

$$C = C_a \left(\frac{D-y}{y} \frac{a}{D-a} \right)^z \dots \dots \dots (2.23)$$

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*.

I. Konsentrasi dan level Acuan (C_a dan a)

- Konsentrasi sedimen suspensi pada dasar ($y = 0$) menurut persamaan Rouse secara matematis nilainya adalah tak terhingga.
- Pendekatan level acuan (a) dalam hubungannya dengan tinggi bentuk dasar.



Gambar 2.1. Sketsa definisi konsentrasi acuan.

- Hasil Eksperimen Balton-Lin (dalam Van Rijn, 1984) menghasilkan persamaan yang baik untuk menentukan nilai konsentrasi acuan C_a , yaitu :

$$C_a = 0.015 \frac{D_{50}}{a} \frac{T^{1.5}}{D^{*0.3}} \dots\dots\dots (2.24)$$

D^* = parameter partikel didekati dengan :

$$D^* = D_{50} \left[\frac{(s - 1) g}{\nu^2} \right]^{1/3} \dots\dots\dots (2.25)$$

T = parameter karakteristik dalam menentukan angkutan muatan dasar.

$$T = \frac{(u'_*)^2 - (u_{*cr})^2}{(u_{*cr})^2} \dots\dots\dots (2.26)$$

dengan $u'_* = (g^{0.5}/C') \bar{U}$ kecepatan gesekan dasar akibat butiran; $C' = 18 \log(12R_b/3D_{90})$ koefisien Chezy akibat butiran; R_b = jari-jari hidraulik dalam kaitannya dengan dasar; \bar{U} = kecepatan aliran rata-rata; dan u_{*cr} = kecepatan gesekan dasar kritik yang dapat dihitung secara analitis maupun grafis menurut Shield.

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 $a = 0.01 d$, 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 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 ini dapat dipresentasikan kedalam profil distribusi konsentrasi sedimen suspensi.

III. CARA PENELITIAN

A. Studi Eksperimental

1. Pendahuluan

- Pengukuran dilakukan pada jarak 600 cm dari entrance flume pada lokasi as flume (*center line*).
- Pengaruh dari suatu *aspect ratio* (b/D) diambil rentang besar, yaitu $2.1 < b/D < 6.9$ untuk pengukuran pada aliran seragam (Kironoto, B. A., 1992).

2. Alat-alat Pengukuran

- Peralatan untuk mengukur konsentrasi sedimen suspensi, menggunakan instrumen pengukuran optik tipe *Foslim-probe* rentang kapasitas pengukuran konsentrasi antara 0-50 gr/liter.
- Pengukuran profil kecepatan tampang arah vertikal dengan menggunakan *Programmable Electro Magnetic Liquid Velocity Meter (P-EMS)*.
- Penetapan variabel kekasaran dasar (k_s) didekati dengan ukuran partikel, yaitu $k_s = 3D_{90}$ (van Rijn :1985) \Rightarrow analisa butiran.

3. Data Acquisition

- Data acquisition (DAQ) adalah suatu proses penyederhanaan untuk mengukur suatu signal nyata yang ada di muka bumi, seperti suatu voltage, yang membawa informasi kedalam komputer untuk diproses, dianalisis, disimpan atau bentuk-bentuk manipulasi data lainnya.
- Untuk memperoleh data digunakan pendekatan *virtual instrumentation (VI)*, DAQ board (dipakai seri Lab-PC-1200/AI), komputer yang telah diinstal dengan LabVIEW dan driver software NIDAQ serta beberapa metode penyambungan dari signal transducer ke board (conector block dengan 50-pin screw terminals).

B. Model Matematika Aliran Turbulen $k-\epsilon$

- Model matematika aliran turbulen k- ϵ merupakan model untuk menyelesaikan permasalahan “aliran turbulen”, namun mengingat gerakan partikel-partikel sedimen suspensi yang berada dalam aliran dipengaruhi oleh sifat turbulensi alirannya, maka model ini digunakan untuk memprediksi distribusi konsentrasi sedimen suspensi.

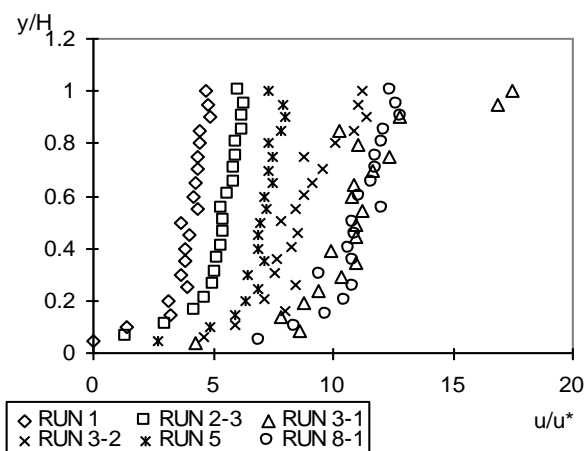
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Studi Eksperimental

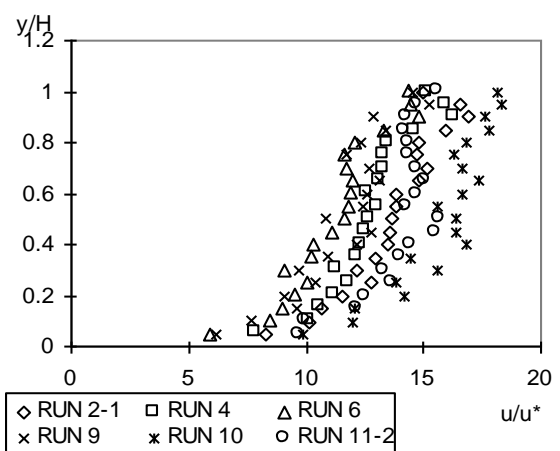
- Ukuran partikel-partikel *material bed* dilakukan analisa butiran (gradasi *non-uniform*) hasilnya sebagai berikut ; $d_{16} = 0.016$ cm, $d_{35} = 0.036$ cm, $d_{50} = 0.048$ cm, $d_{84} = 0.125$ cm, dan $d_{90} = 0.14$ cm serta rapat massa 2.57 gr/cm³.
- Angka standar deviasi geometrik yaitu $\sigma_s = 0.5(d_{84}/d_{50} + d_{50}/d_{16}) = 2.802$, dan nilai D_s akan bervariasi tergantung kepada kondisi alirannya, yang dapat dilihat pada besarnya nilai parameter T (*transport stage parameter*) yang berubah-ubah, nilai $D_s = d_{50} \{1 + 0.011(\sigma_s - 1)(T-25)\}$, D_s untuk tiap running aliran yang dikerjakan bervariasi antara $0.0246 - 0.0363$ cm, sehingga jelas bahwa diameter partikel suspensi lebih kecil dari partikel material dasar.

1. Profil Kecepatan

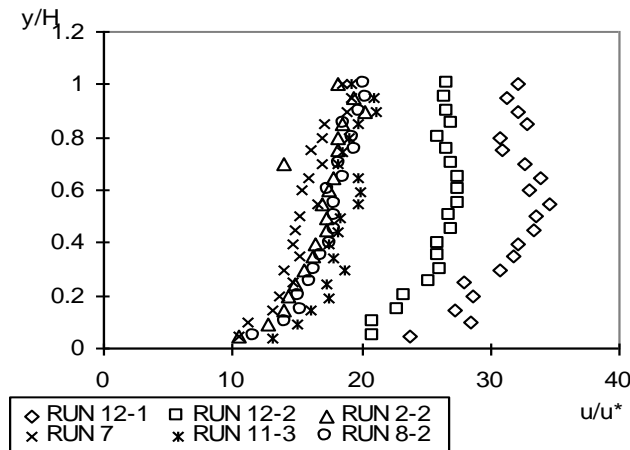
- Seri aliran RUN 12-1 \Rightarrow pengaruh kekasaran dasar berubah selama pengukuran
 \Rightarrow perubahan konfigurasi dasar (*riple*, ukuran rata-rata panjang 6.5 cm dan tinggi 0.4 cm)
- Seri aliran RUN 3-1 \Rightarrow *aspect ratio* $b/H < 5$
 \Rightarrow pada permukaan terjadi penyimpangan yang menyolok akibat adanya pengaruh dinding.
 \Rightarrow debit semakin besar maka distribusi profil kecepatan `semakin tidak seragam.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.1 Profil distribusi kecepatan untuk beberapa variasi parameter aliran.

- Perhitungan u_* Metode Clauser memanfaatkan nilai kecepatan rata-rata titik hasil pengukuran (pada profil kecepatan) bersama-sama dengan persamaan distribusi kecepatan logaritmis (*log-law*) $u/u_* = 1/\kappa \ln(y/k_s) + Br$, berlaku pada wilayah dalam (*inner region*), batasan $y/\delta \leq 0.2$.
- 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).

Tabel 4.2 Perbandingan hitungan u_* metode *Clauser's* dengan *Energy Gradient*

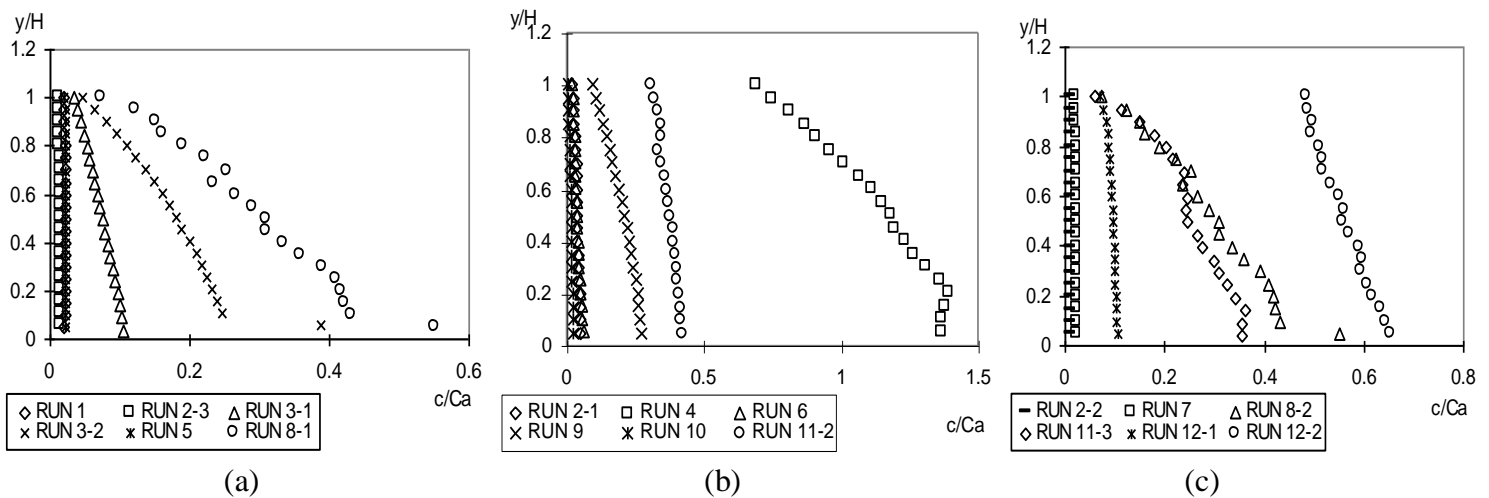
RUN	So (-)	H (cm)	Energi u_{*eg} - cm/det	Clauser's u_* - cm/det	$(u_* - u_{*eg})/u_*$ (%)
RUN 1	0.00183	11.50	4.5437	5.9064	23.07
RUN 2-1	0.00183	12.00	4.6414	1.4471	220.74
RUN 2-2	0.00255	12.70	5.6365	1.3778	309.09
RUN 2-3	0.00255	9.40	4.8492	5.18	6.39
RUN 3-1	0.00122	15.50	4.3010	1.6354	162.99
RUN 3-2	0.00122	9.40	3.3494	3.0237	10.77
RUN 4	0.000487	10.00	2.1849	2.3275	6.13
RUN 5	0.00183	11.80	4.5955	4.3828	4.85
RUN 6	0.00122	11.00	3.6284	2.6702	35.88
RUN 7	0.00183	12.00	4.6414	2.0377	127.78
RUN 8-1	0.00183	11.50	4.5437	2.8693	58.36
RUN 8-2	0.00061	12.00	2.6797	1.7033	57.33
RUN 9	0.00122	11.30	3.6757	3.2676	12.49
RUN 10	0.00255	12.00	5.4789	2.294	138.84
RUN 11-1	0.000487	10.40	2.2290	8.5568	73.95
RUN 11-2	0.00067	11.40	2.7354	2.8772	4.93

RUN 11-3	0.00067	14.00	3.0334	1.8826	61.13
RUN 12-1	0.00146	11.80	4.1110	1.4084	191.89
RUN 12-2	0.00067	12.00	2.8084	1.7928	56.65

- Hasil perhitungan u_{*eg} pada umumnya memperlihatkan nilai kesalahan yang besar terhadap u_* metode Clauser, implikasinya bahwa perkiraan Se sama dengan So adalah kurang tepat untuk beberapa kasus seri aliran.

2. Konsentrasi Sedimen Suspensi

- Pada wilayah dekat dasar energi per satuan waktu (daya) cukup besar.
- profil distribusi kecepatan \Rightarrow wilayah dasar, kecepatan minimum \Rightarrow kecepatan endap partikel besar \Rightarrow banyak terakumulasi partikel-partikel \Rightarrow kuantitas konsentrasi sedimen suspensi lebih besar pada wilayah dasar.
- permukaan aliran \Rightarrow kecepatan maksimum \Rightarrow kecepatan endap partikel kecil \Rightarrow gaya untuk menggerakkan dan mengangkat partikel lebih besar \Rightarrow partikel senantiasa tersuspensi sepanjang aliran dan kuantitas konsentrasi sedimen suspensi relatif kecil.



Gambar 4.2 Profil konsentrasi sedimen suspensi hasil pengukuran.

- Formulasi distribusi sedimen suspensi Rouse, pada posisi dasar nilai $y = 0 \Rightarrow$ konsentrasi sedimen suspensi tak terhingga \Rightarrow sedimen merupakan *bed load* dari pada *suspended load*.
- permasalahan \Rightarrow batas kondisi angkutan bed load dan suspended load.
- Einstein (1950) \Rightarrow sedimen suspensi tidak mungkin terjadi di daerah lapisan dasar (*bed layer*), yaitu lapisan yang tebalnya kurang lebih dua kali ukuran butiran.
- van Rijn (1986) dari hasil penelitiannya mengajukan level acuan (*reference level*) minimum sebesar $a = 0.01 H$ atau $a = k_s$, pada kondisi level acuan ini *bed load* berada dan sekaligus merupakan sumber terjadinya *suspended load*, \Rightarrow *reference of concentration* - Ca
- Perhitungan level acuan hasil pengukuran menggunakan persamaan $\ln \frac{c}{Ca} = -w_s / \varepsilon_s (y - a)$.

- Hasil perhitungan rata-rata menunjukkan bahwa level acuan (a) dapat didekati dengan $0.0372 H \pm 0.0086$ (H adalah kedalaman aliran).
- Konsentrasi sedimen suspensi rata-rata pada satu tampang secara teoritis dapat dihitung dengan metode *Straub* (Bogardi, 1978 : 424), pengukuran cukup dilakukan pada dua titik pada arah vertikal, yaitu pada titik 0.2 H dan 0.8 H dari kedalaman aliran. Secara matematis konsentrasi sedimen suspensi rata-rata dapat dirumuskan $\bar{C}_s = \left(\frac{5}{8} C_{0.2H} + \frac{3}{8} C_{0.8H} \right)$, dengan $C_{0.2H}$ dan $C_{0.8H}$ adalah konsentrasi sedimen suspensi pada kedalaman 0.2 H dan 0.8 H.

Tabel 4.3 Perhitungan level acuan

Seri aliran	y (cm)	Ca (gr/cm ³)	H (cm)	w _s (cm/det)	a/H (-)
RUN 2-1	0.554	0.03272	12.00	4.9391	0.0401
RUN 2-2	0.554	0.05979	12.70	5.5924	0.0268
RUN 2-3	0.554	0.04846	9.40	5.0093	0.0383
RUN 3-1	0.554	0.01960	15.50	4.6888	0.0322
RUN 6	0.554	0.01366	11.00	4.2492	0.0474
RUN 7	0.554	0.03132	12.00	4.8850	0.0211
RUN 8-1	0.554	0.03002	11.50	4.7414	0.0233
RUN 8-2	0.554	0.00303	12.00	3.8678	0.0459
RUN 9	0.554	0.01348	11.30	4.3139	0.0451
RUN 10	0.554	0.05323	12.00	5.3685	0.0364
RUN 11-2	0.554	0.00276	11.40	3.8976	0.0429
RUN 11-3	0.554	0.00432	14.00	4.0364	0.0353
RUN 12-1	0.554	0.01769	11.80	4.4800	0.0414
RUN 12-2	0.554	0.00267	12.00	3.8069	0.0449
mean					0.0372
st. dev.					0.0086

- Konsentrasi sedimen suspensi rata-rata \Rightarrow profil distribusi konsentrasi sedimen suspensi, formulasi $\bar{C} = A/H$, A adalah luas areal di bawah kurva distribusi konsentrasi sedimen suspensi. Nilai A dihitung dengan mengintegrasikan luasan masing-masing pias dalam kurva, $dA = 1/2 (c_b + c_t) dH$, c_b dan c_t adalah masing-masing konsentrasi pada bagian bawah dan atas pias yang membatasinya, secara matematis dapat ditulis $A = 1/2 \int_a^H (c_{=a} + c_{=H}) dH$ atau $A = 1/2 (H - a) (c_{=a} + c_{=H})$.
- Hasil pengukuran dibandingkan terhadap teori *Straub* yang menunjukkan bahwa relatif error maksimum 21.59 % dan minimum 4.51 %.

Tabel 4.4 Perhitungan konsentrasi sedimen suspensi rata-rata

Seri aliran (-)	A (gr.cm/lit)	H (cm)	a (cm)	H-a (cm)	Konsentrasi pengukuran lokal (gr/lit)				Konsentrasi rata-rata (gr/lit)		Error (%)
					$C_{=a}$	$C_{=H}$	$C_{0.2H}$	$C_{0.8H}$	pengukuran, \bar{C}	<i>Straub</i> , \bar{C}_s	
RUN 1	7.5219	11.48	0.554	10.925	0.7230	0.6537	0.7198	0.6707	0.6553	0.7014	7.038
RUN 2-1	14.447	11.95	0.554	11.400	1.6066	0.7332	1.6025	0.9980	1.2085	1.3758	13.84
RUN 2-2	7.9647	12.62	0.554	12.065	0.6883	0.6323	0.6703	0.6417	0.6312	0.6596	4.505
RUN 2-3	5.9755	9.48	0.554	8.930	0.7033	0.6350	0.6920	0.6495	0.6301	0.6761	7.301
RUN 3-1	20.176	15.28	0.554	14.725	2.0726	0.6678	1.8908	1.0388	1.3205	1.5713	18.99
RUN 3-2	18.1	9.48	0.554	8.930	4.7074	0.5566	2.8102	1.3195	1.9085	2.2512	17.96
RUN 4	11.617	10.05	0.554	9.500	1.5236	0.7676	1.5506	1.0115	1.1554	1.3485	16.71

RUN 5	7.7754	11.76	0.554	11.210	0.7216	0.6541	0.7162	0.6744	0.6610	0.7005	5.986
RUN 6	5.899	11.00	0.554	10.450	0.8434	0.2856	0.7199	0.4004	0.5361	0.6001	11.94
RUN 7	8.0109	11.95	0.554	11.400	0.7412	0.6558	0.7313	0.6795	0.6701	0.7119	6.225
RUN 8-1	15.519	11.48	0.554	10.925	1.6719	0.6791	1.6651	1.1661	1.3520	1.4780	9.322
RUN 8-2	11.287	11.95	0.554	11.400	1.6719	0.2183	1.2638	0.5739	0.9442	1.0051	6.448
RUN 9	28.478	11.29	0.554	10.735	3.7312	1.2585	3.4852	1.9637	2.5227	2.9146	15.54
RUN 10	9.5787	11.95	0.554	11.400	1.2874	0.2003	1.1901	0.5776	0.8013	0.9604	19.86
RUN 11-2	10.853	11.38	0.554	10.830	1.1628	0.8414	1.1184	0.9493	0.9533	1.0550	10.66
RUN 11-3	14.212	13.85	0.554	13.300	1.5401	0.2585	1.4724	0.8724	1.0259	1.2474	21.59
RUN 12-1	18.501	11.76	0.554	11.210	1.8799	1.2194	1.8142	1.5444	1.5727	1.7130	8.924
RUN 12-2	17.341	11.95	0.554	11.400	1.7481	1.2943	1.6444	1.3596	1.4507	1.5376	5.995

Tabel 4.5 Perhitungan posisi nilai konsentrasi rata-rata pengukuran

Seri (-)	Nilai c pada 2 titik (gr/lit)		$\bar{C}_{2\text{titik}}$ (gr/lit)	$\bar{C}_{\text{pengukuran}}$ (gr/lit)	Error (%)	posisi nilai \bar{C} pengukuran		
	1 titik	2 titik						
RUN 1	0.7108	0.6653	0.6880	0.6553	5.00	-	0.29 H	0.85 H
RUN 2-1	1.5402	0.8554	1.1978	1.2085	0.89	0.675 H	0.25 H	0.89 H
RUN 2-2	0.6703	0.6417	0.6560	0.6312	3.94	-	0.2 H	0.8 H
RUN 2-3	0.6809	0.6418	0.6613	0.6301	4.96	-	0.355 H	0.9 H
RUN 3-1	1.8908	0.7783	1.3345	1.3205	1.06	0.6 H	0.188 H	0.95 H
RUN 3-2	2.8102	0.9799	1.8950	1.9085	0.70	0.62 H	0.2 H	0.9 H
RUN 4	1.5262	0.8313	1.1788	1.1554	2.02	0.68 H	0.1 H	0.95 H
RUN 5	0.7111	0.6678	0.6894	0.6610	4.31	-	0.3 H	0.89 H
RUN 6	0.7199	0.3562	0.5381	0.5361	0.37	0.5 H	0.2 H	0.85 H
RUN 7	0.7236	0.6709	0.6972	0.6701	4.04	0.8 H	0.3 H	0.89 H
RUN 8-1	1.6195	1.0696	1.3446	1.3520	0.55	0.70 H	0.29 H	0.849 H
RUN 8-2	1.3063	0.5739	0.9401	0.9442	0.44	0.44 H	0.1 H	0.8 H
RUN 9	3.4053	1.6185	2.5119	2.5227	0.43	0.62 H	0.25 H	0.89 H
RUN 10	1.0385	0.5776	0.8081	0.8013	0.85	0.65 H	0.39 H	0.8 H
RUN 11-2	1.1184	0.9098	1.0141	0.9533	6.37	0.5 H	0.2 H	0.84 H
RUN 11-3	1.4724	0.6396	1.0560	1.0259	2.94	0.64 H	0.2 H	0.89 H
RUN 12-1	1.7435	1.5114	1.6275	1.5727	3.48	0.73 H	0.35 H	0.85 H
RUN 12-2	1.6444	1.3596	1.5020	1.4507	3.54	0.44 H	0.2 H	0.8 H
					mean	0.599 H	0.24 H	0.86 H
					stdev	0.098	0.081	0.047

- Nilai rata-rata untuk pengukuran satu titik $\Rightarrow \bar{C} = C_{0.599\text{ H}} \pm 0.098$
- Nilai rata-rata untuk pengukuran dua titik $\Rightarrow \bar{C} = 1/2 (C_{0.24\text{ H}} + C_{0.86\text{ H}})$, dengan $C_{0.24\text{ H}}$ dan $C_{0.86\text{ H}}$ berturut-turut adalah konsentrasi sedimen suspensi pada kedalaman 0.24 H dan 0.86 H dari dasar.

3. Intensitas Turbulen

- Fluktuasi kecepatan arah vertikal \Rightarrow kuantitas konsentrasi sedimen suspensi tidak seragam.
- Intensitas turbulen = *Root Mean Square* nilai fluktuasi kecepataannya, intensitas turbulen arah longitudinal = *Root Mean Square* (RMS) nilai fluktuasi kecepatan pada arah horizontal,

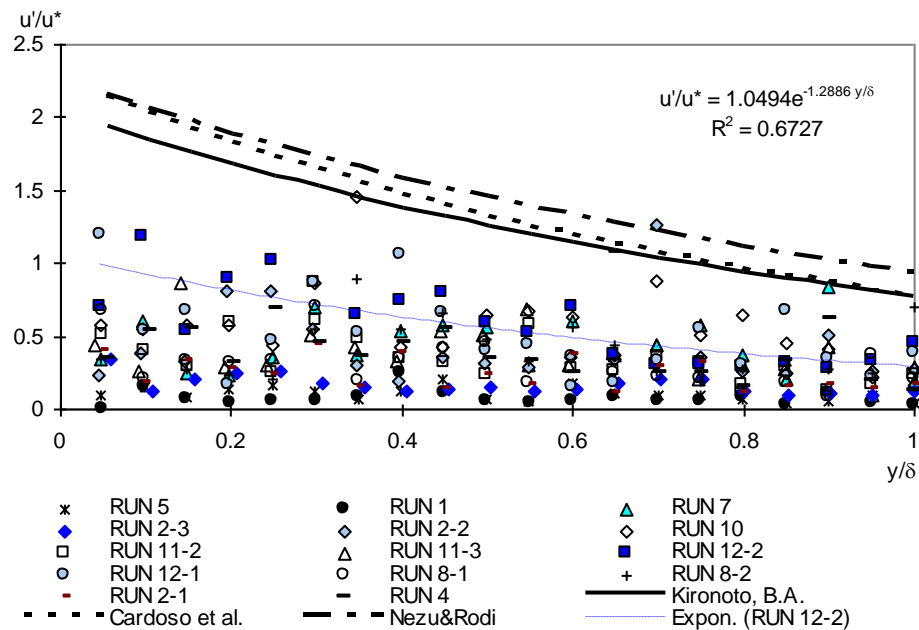
$$\text{dirumuskan sebagai } u' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (u_i - u)^2}{N - 1}}.$$

- Intensitas turbulen hasil pengukuran dibandingkan dengan persamaan-persamaan yang telah ada.

$$\Rightarrow \text{Nezu and Rodi (1986); } \frac{u'}{u_*'} = 2.26e^{-0.88y/\delta} \text{ untuk batas halus dan kasar.}$$

$$\Rightarrow \text{Kironoto, B.A. (1993); } \frac{u'}{u_*'} = 2.04e^{-0.97y/\delta}; \text{ untuk batas kasar dan dasar fix bed.}$$

- Intensitas turbulen yang kecil mempunyai korelasi dengan distribusi konsentrasi sedimen suspensi, Gambar 4.2 (a) menunjukkan bahwa pada seri aliran RUN 1 distribusi sedimen suspensi lebih seragam dibandingkan dengan seri aliran lainnya.



Gambar 4.3 Intensitas turbulen arah longitudinal.

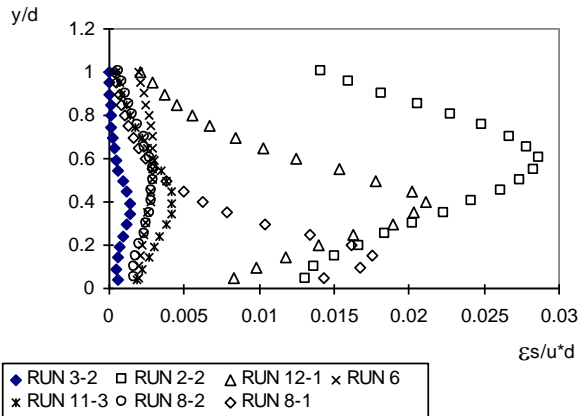
- Nezu (1977) \Rightarrow intensitas turbulen berdistribusi eksponensial : $\frac{u'}{u_*} = D_1 e^{-\lambda_1 y/\delta}$

Hasil pengukuran 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

$$\frac{u'}{u_*} = 1.05 e^{-1.29 y/\delta} \text{ dengan koefisien korelasi } r = 0.82$$

4. Koefisien Diffusi Sedimen Suspensi

- Hasil pengukuran konsentrasi sedimen suspensi diaplikasikan kedalam bentuk persamaan matematis untuk profil konsentrasi sedimen suspensi yang dipengaruhi oleh difusi, $w_s C + \epsilon_s \frac{dC}{dy} = 0$. Nilai dC/dy dapat diperoleh dari profil konsentrasi sedimen suspensi hasil pengukuran, dengan teknik fitting curve.

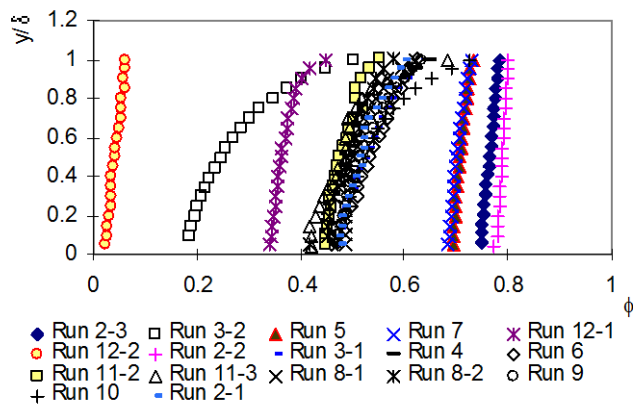


Gambar 4.4 Koefisien diffusi sedimen suspensi.

- Nilai ϵ_s bervariasi terhadap kedalaman dan pada gambar di atas nilai ϵ_s berdistribusi yang mengikuti trend parabolic non-simetris.

5. 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, formula $\phi = 1 + [c/Ca]^{0.8} - 2[c/Ca]^{0.4}$ (Van Rijn, 1984).
- Dari Gambar 4.5 diketahui bahwa kehadiran partikel-partikel sedimen suspensi berpengaruh terhadap turbulensi fluida, yaitu dengan mengamati nilai $\phi < 1$ untuk setiap seri aliran, gejala ini menunjukkan telah terjadi redaman pada aliran yang bermuatan sedimen.



Gambar 4.5 Damping turbulensi fluida oleh partikel sedimen suspensi.

B. Model Aliran Turbulen **k-ε**

1. Penetapan Persamaan

- Parameter pokok: energi kinetik turbulen k , dan energi disipasi ϵ .

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \dots\dots\dots (4.1)$$

- Untuk aliran dua dimensi-steady, persamaan kontinuitas, momentum dan persamaan transport untuk k dan ϵ didasarkan pada format berikut :

⇒ Persamaan Kontinuitas :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (4.2)$$

⇒ Persamaan Momentum :

$$\frac{\partial}{\partial x}(u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(uv) = \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial y} \right) + gS_o - g \frac{dD}{dx} \dots\dots\dots (4.3)$$

⇒ Persamaan Transport :

$$\frac{\partial}{\partial x}(uk) + \frac{\partial}{\partial y}(vk) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + G - \epsilon \dots\dots\dots (4.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(u\epsilon) + \frac{\partial}{\partial y}(v\epsilon) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} G - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \dots\dots\dots (4.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(u\phi) + \frac{\partial}{\partial y}(v\phi) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_t}{\sigma_\phi} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_\phi \dots\dots\dots (4.6)$$

dengan G-energi produksi turbulen $G = v_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (4.7)$

2. Kondisi Batas

(1) pada dasar saluran yaitu pada $y = 0$ untuk seluruh x , (2) pada batas paling atas yaitu pada $y = D$ untuk seluruh x , dan (3) pada tampang awal (*initial cross section*) yaitu pada $x = 0$ untuk seluruh y (*initial profile*).

2.1 Kondisi Batas pada Dasar

- Distribusi kecepatan di dekat dasar (u_w) yang masih berlaku hukum logaritma, dapat diekspresikan menurut persamaan berikut.

$$\frac{u_w}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y_w}{k_s} \right) + Br \dots\dots\dots (4.8)$$

dengan u_w kecepatan pada jarak y_w (titik grid hitungan terdekat) dari dasar.

- Konstanta integrasi Br dapat ditentukan secara matematis menurut persamaan berikut.

$$Br = \left[5.5 + 2.5 \ln \left(\frac{u_* k_s}{v} \right) \right] \exp \left\{ -0.217 \left[\ln \left(\frac{u_* k_s}{v} \right) \right]^2 \right\} + 8.5 \left(1 - \exp \left\{ -0.217 \left[\ln \left(\frac{u_* k_s}{v} \right) \right]^2 \right\} \right) \dots\dots\dots (4.9)$$

- Dengan anggapan telah dibuktikan dari hasil-hasil pengukuran, bahwa di daerah dekat dasar struktur turbulen mencapai kondisi keseimbangan, yaitu bahwa $G = \epsilon$ dan tegangan geser total τ pada kondisi batas ini dapat dianggap konstan dan besarnya sama dengan tegangan geser pada dasar (yaitu $\tau = \tau_b$), maka besar energi kinetik turbulen (k_w) dan energi yang hilang (ϵ_w) di daerah dekat dasar dapat dievaluasi dengan persamaan berikut.

$$k_w = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad ; \quad \epsilon_w = \frac{u_*^3}{\kappa y_w} \dots\dots\dots (4.10)$$

2.2 Kondisi Batas pada Muka Air

- Karena struktur turbulen mengalami perubahan, maka energi dissipasi ϵ atau energi kinetik k , juga akan mengalami perubahan. Dengan menggunakan persamaan 4.10 energi dissipasi yang terjadi di dekat muka air dapat dirumuskan berikut ini.

$$\epsilon_f = \frac{C_f [k_f \sqrt{C_\mu}]^{1.5}}{\kappa y_f} \dots\dots\dots (4.11)$$

dengan ϵ_f dan $k_f (= u_*^2 / \sqrt{C_\mu})$ masing-masing adalah energi dissipasi dan energi kinetik turbulen, y_f adalah jarak terdekat titik grid terhadap muka air dan C_f adalah suatu angka konstan empirik yang nilainya $C_f = 0.164$.

4. Konsentrasi Sedimen Suspensi

Distribusi sedimen suspensi dapat diperoleh dari persamaan difusi untuk sedimen suspensi dengan persamaan berikut.

$$w_s c + \Gamma \frac{\partial c}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (4.31)$$

persamaan ini dapat ditulis sebagai :

$$\Gamma \frac{dC}{dy} = -w_s C \quad \Rightarrow \quad \frac{dC}{C} = -w_s \frac{dy}{\Gamma}$$

bila diintegalkan kedua sukunya untuk batas wilayah a sampai y seperti berikut.

$$\int_a^y \frac{dC}{C} = -w_s \int_a^y \frac{dy}{\Gamma}$$

$$[\ln C]_a^y = -w_s \int_a^y \frac{dy}{\Gamma} \quad \Rightarrow \quad \ln C - \ln C_a = -w_s \int_a^y \frac{dy}{\Gamma}$$

$$C = C_a \text{ Exp} \left[-w_s \int_a^y \frac{dy}{\Gamma} \right] \dots\dots\dots (4.32)$$

Nilai Γ dapat diperoleh dengan anggapan bahwa distribusi difusi turbulen (*eddy diffusivity*) proporsional dengan viskositas turbulen ν_t , yaitu :

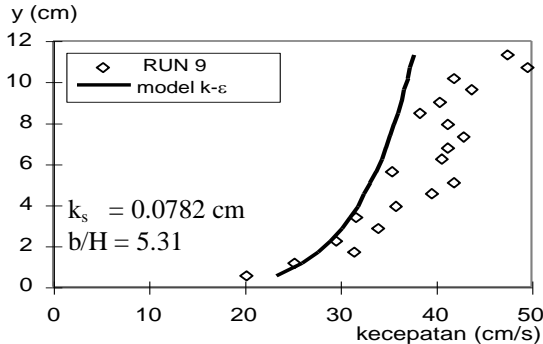
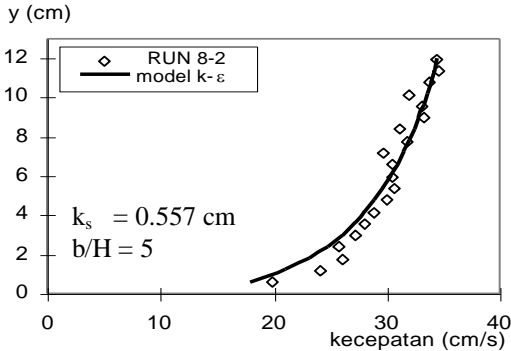
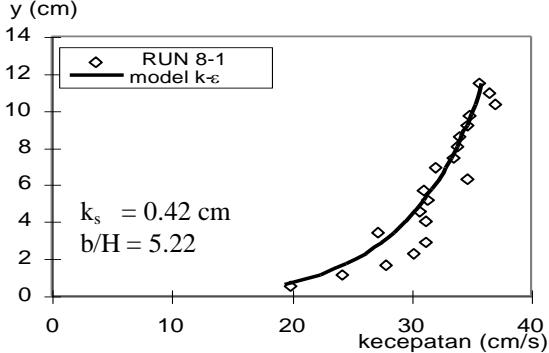
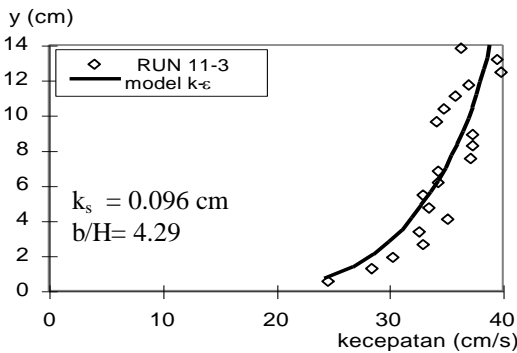
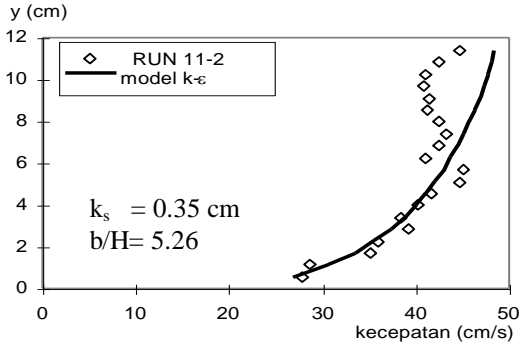
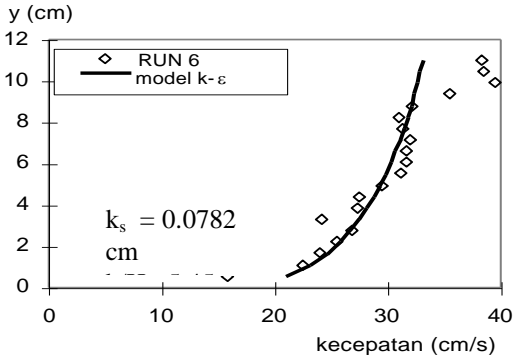
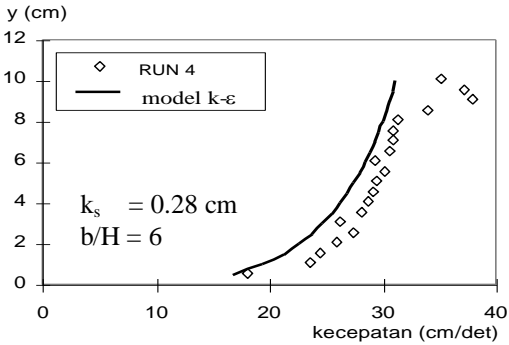
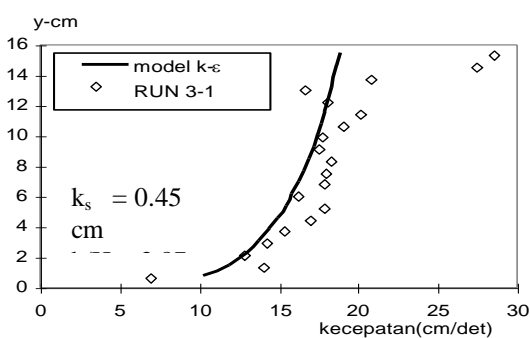
$$\Gamma(y) = \beta \nu_t(y) \dots\dots\dots (4.33)$$

dengan β adalah suatu konstanta proporsional yang dapat diambil $\beta=1$, sedangkan nilai v_t diperoleh dari hasil hitungan model matematika k- ϵ menurut persamaan berikut.

$$v_t = \frac{-\rho u_f v_f}{(du/dy)} \dots\dots\dots (4.34)$$

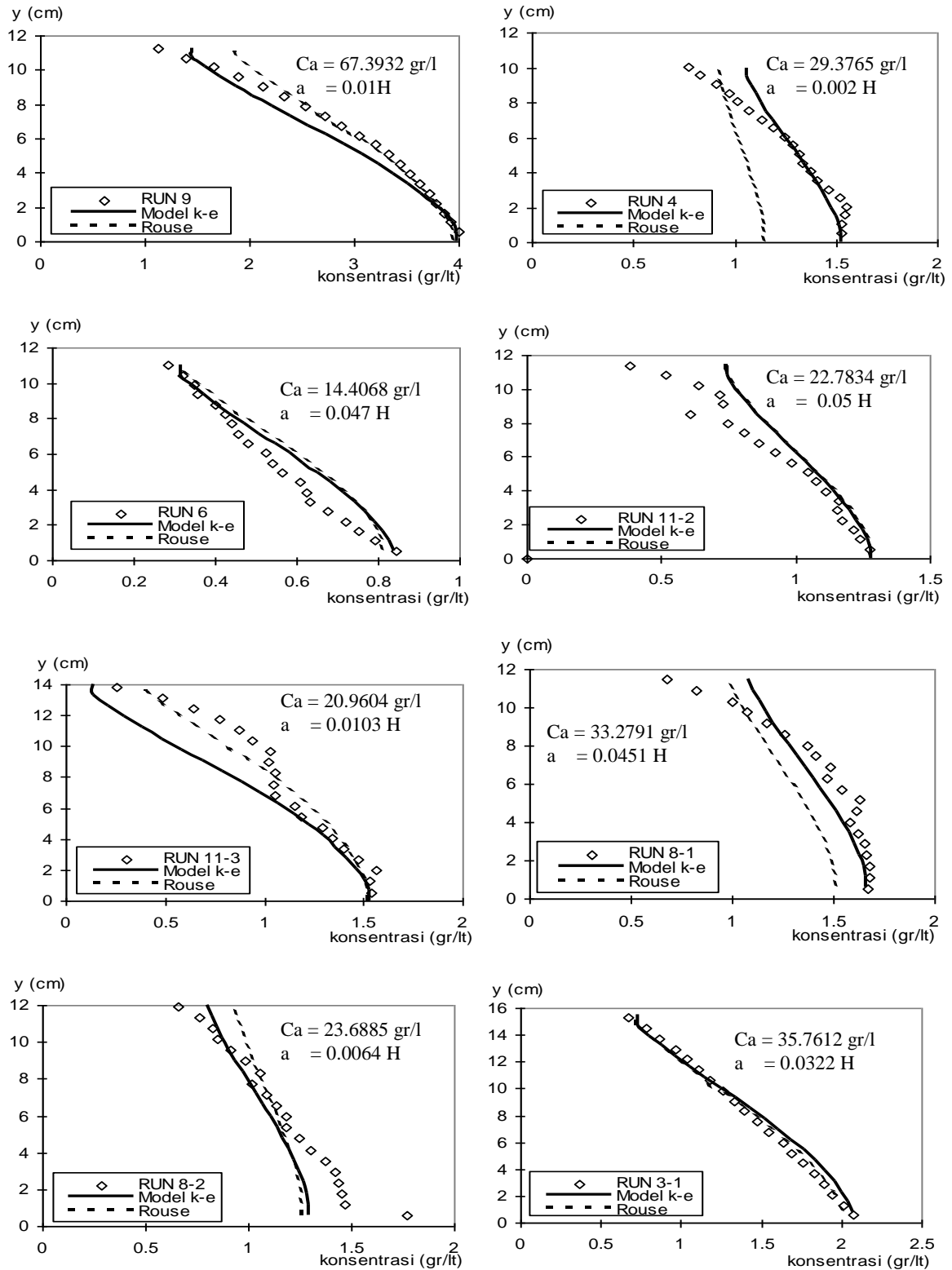
6. Perbandingan Hasil Pengukuran Dengan Model Turbulen k- ϵ

6.1 Distribusi Kecepatan



Gambar 4.6 Perbandingan profil distribusi kecepatan hasil pengukuran dengan model aliran turbulen k-ε.

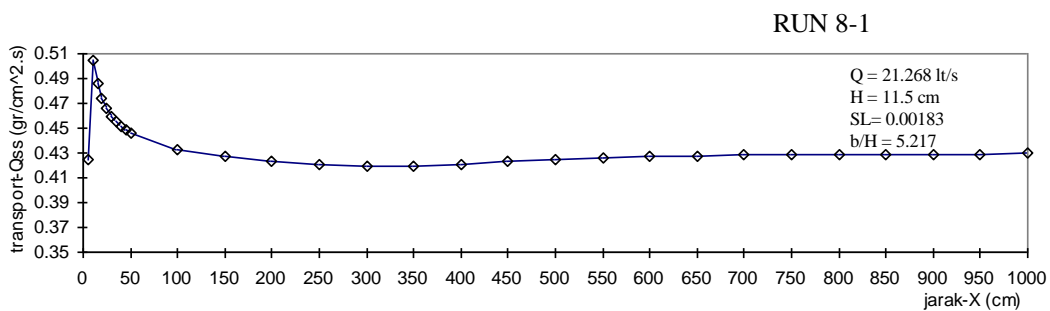
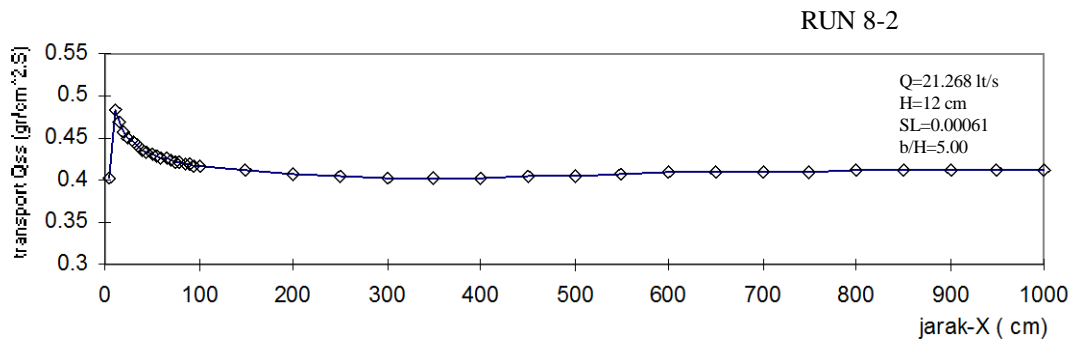
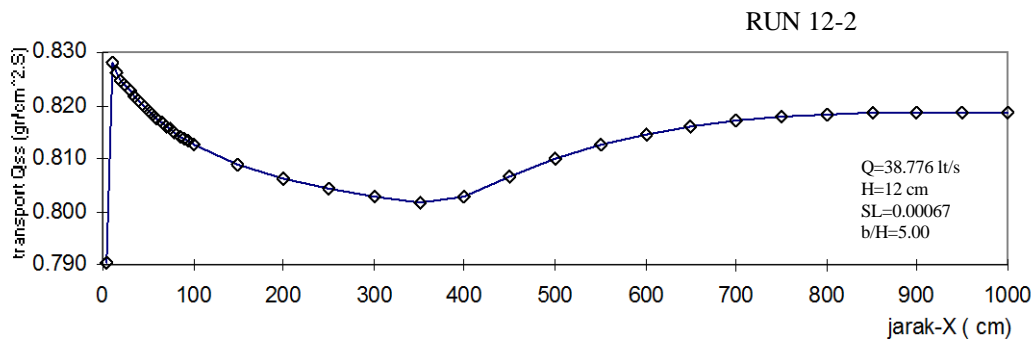
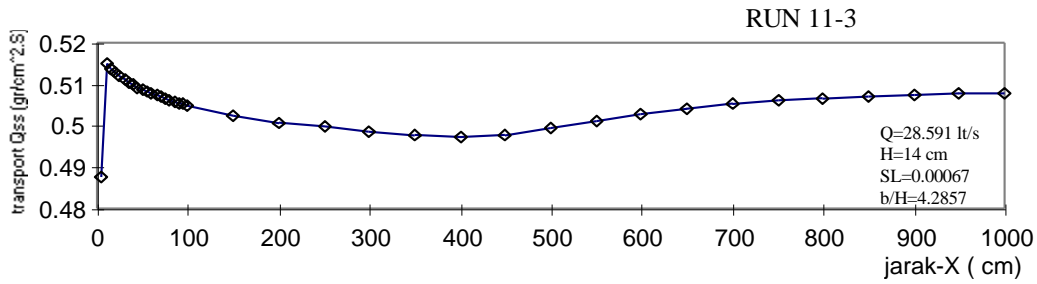
6.2 Distribusi Konsentrasi Sedimen Suspensi



Gambar 4.7 Perbandingan profil distribusi konsentrasi sedimen suspensi hasil pengukuran, model aliran turbulen k-ε dan distribusi Rouse.

7. Transport Sedimen Suspensi

- Transport sedimen suspensi (Q_{ss}) dihitung, $Q_{ss} = \int_a^y u(y)c(y) dy$. Angkutan sedimen di bawah level acuan merupakan angkutan dasar, dengan demikian Q_{ss} merupakan transport sedimen suspensi total pada tampang yang ditinjau.



Gambar 4.8 Transport sedimen suspensi.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

1. Untuk memperoleh nilai konsentrasi sedimen suspensi rata-rata pada saluran terbuka aliran dua dimensi uniform dapat dilakukan dengan pengukuran satu titik yaitu pada $\bar{C} = C_{0.599 H}$, sedangkan untuk pengukuran dua titik dapat dihitung dengan $\bar{C} = 1/2 (C_{0.24 H} + C_{0.86 H})$, dengan H , $C_{0.599 H}$, $C_{0.24 H}$ dan $C_{0.86 H}$ berturut-turut adalah kedalaman aliran, nilai konsentrasi sedimen suspensi pada kedalaman $0.599 H$, $0.24 H$ dan $0.86 H$ dari dasar saluran.
2. Batas perbedaan antara angkutan ditranspor sebagai sedimen suspensi (*suspended load*) dengan angkutan dasar (*bed load*) ditetapkan nilai level acuan a , nilai a dapat didekati dengan $a = 0.0372 H$ untuk aliran bersedimen uniform. Angkutan di bawah a adalah *bed load* dan di atasnya adalah *suspended load*.
3. Intensitas turbulen pada aliran bermuatan sedimen cenderung menurun akibat adanya partikel-partikel sedimen suspensi bila dibandingkan dengan intensitas turbulen untuk aliran jernih, terutama di wilayah dekat dasar yang memiliki 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*).
4. Terjadinya sedimen suspensi yang disertai dengan *bed load*, dapat memecahkan struktur jaringan aliran, terutama pada bagian permukaan yang asalnya laminar akan berubah menjadi turbulen, sehingga total kedalaman aliran menjadi turbulen.
5. Koefisien difusi sedimen suspensi bervariasi terhadap kedalaman mengikuti trend kurva membentuk parabola asimetris.

6. Kehadiran partikel-partikel sedimen suspensi pada aliran bermuatan sedimen dapat meredam turbulensi aliran fluida (*damping effect*).
7. Profil distribusi konsentrasi sedimen suspensi dan profil distribusi kecepatan pada model aliran turbulen k- ϵ dapat disesuaikan dengan hasil pengukuran dengan mengatur parameter level acuan a dan kekasaran dasar k_s . Parameter lain yang diperlukan model adalah debit per satuan lebar, kedalaman aliran, kemiringan dasar saluran, diameter partikel material bed dan rapat massa. Sehingga dengan menyamakan parameter-parameter tersebut dengan setting pengukuran di laboratorium, memberikan hasil simulasi model k- ϵ dengan hasil pengukuran yang cukup memadai.

B. Saran

1. Viskositas turbulen perlu diperhitungkan dalam memprediksi angkutan sedimen suspensi, yaitu dengan mengukur Reynold stress ($-\rho u_f v_f$), yang selanjutnya berguna untuk mengevaluasi nilai konstanta von Karman untuk aliran bermuatan sedimen serta uniform.
2. Perlu kajian lanjut mengenai sebaran diameter partikel sedimen suspensi untuk beberapa zona tampang vertikal, sebab hal ini akan menimbulkan perbedaan dalam menafsirkan kecepatan jatuh partikel, sehingga hasilnya akan diperoleh range kecepatan jatuh yang lebih teliti.
3. 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, misalnya dengan percepatan atau perlambatan.
4. Pengukuran konsentrasi sedimen suspensi dengan material dasar tetap (*fix bed*) perlu dilakukan, kemudian pengaruhnya dapat dibandingkan dengan *movable bed* untuk setiap parameter penting, misalnya intensitas turbulen, profil distribusi konsentrasi sedimen suspensi dan lainnya.