

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Deskripsi Data

Profil distribusi konsentrasi sedimen suspensi dan profil distribusi kecepatan diperoleh dari data pengukuran output sinyal yang dikeluarkan oleh sensor Foslim-probe dan P-EMS probe berupa analog voltage. Agar data ini dapat mewakili karakter aliran yang diinginkan, maka perlu dikonversikan kedalam persamaan konversi yang diperoleh melalui proses kalibrasi untuk tiap-tiap jenis alat.

Parameter-parameter lain yang diukur pada saat melakukan seri running aliran diantaranya berupa; debit aliran yang terbaca langsung pada panel display flume, debit yang terbaca ini dikalibrasi lagi dengan menggunakan current meter sehingga hasilnya menjadi debit yang terukur, kedalaman aliran, kemiringan dasar saluran, suhu air, ukuran partikel dan rapat massanya.

Data yang dipakai adalah merupakan data hasil pengukuran pada flume di Laboratorium Hidrologi & Hidraulika PAU Ilmu Teknik UGM , diperoleh dengan memanfaatkan fasilitas hardware yang disiapkan oleh National Instrumens Data Acquisition (NI-DAQ/Lab-PC-1200 AI *board*) dan software LabVIEW. Parameter umum (data hidraulik) dalam melakukan pengukuran di laboratorium seperti tertera pada tabel 4.1 di bawah ini.

Comment [BILA1]:

Tabel 4.1 Variabel-variabel pengukuran aliran bermuatan sedimen

RUNNING CODE	Q (.10 ³ m ³ /det)	So (-)	H (cm)	t (°C)	b/H (-)	U (cm/det)	v (cm ² /det)	Re (-)	Fr (-)	Ca (gr/cm ³)	Ds (cm)	w _s (cm/det)
RUN 1	11.8517	0.00183	11.50	28.10	5.2174	17.1764	0.00838	94337.372	0.1617	0.03212	0.03163	4.8169
RUN 2-1	12.8979	0.00183	12.00	30.00	5.0000	17.9138	0.00805	106856.720	0.1651	0.02967	0.03200	4.9391
RUN 2-2	12.8979	0.00255	12.70	30.40	4.7244	16.9264	0.00798	107754.771	0.1516	0.05979	0.03628	5.5924
RUN 2-3	12.8979	0.00255	9.40	28.65	6.3830	22.8686	0.00828	103867.164	0.2381	0.04846	0.03275	5.0093
RUN 3-1	14.9903	0.00122	15.50	28.50	3.8710	16.1186	0.00830	120335.302	0.1307	0.03576	0.03073	4.6888
RUN 3-2	14.9903	0.00122	9.40	28.00	6.3830	26.5785	0.00839	119067.000	0.2768	0.01212	0.02760	4.1527
RUN 4	16.0365	0.00049	10.00	28.75	6.0000	26.7275	0.00826	129415.297	0.2699	0.02537	0.02493	3.7138
RUN 5	17.0827	0.00183	11.80	27.25	5.0847	24.1281	0.00853	133534.071	0.2243	0.03171	0.03167	4.7929
RUN 6	19.1751	0.00122	11.00	27.50	5.4545	29.0532	0.00848	150693.525	0.2797	0.01441	0.02828	4.2492
RUN 7	20.2213	0.00183	12.00	29.50	5.0000	28.0851	0.00813	165782.816	0.2589	0.03132	0.03174	4.8850
RUN 8-1	21.2675	0.00183	11.50	27.50	5.2174	30.8225	0.00848	167137.305	0.2902	0.03328	0.03130	4.7414
RUN 8-2	21.2675	0.00061	12.00	28.75	5.0000	29.5382	0.00826	171629.710	0.2722	0.02369	0.02579	3.8678
RUN 9	22.3137	0.00122	11.30	29.00	5.3097	32.9111	0.00822	181024.104	0.3126	0.06739	0.02833	4.3139
RUN 10	27.5447	0.00255	12.00	29.50	5.0000	38.2565	0.00813	225823.163	0.3526	0.02347	0.03494	5.3685
RUN 11-1	28.5909	0.00049	10.40	29.50	5.7692	45.8188	0.00813	234400.355	0.4536	0.00043	0.02460	3.6819
RUN 11-2	28.5909	0.00067	11.40	28.00	5.2632	41.7996	0.00839	227095.701	0.3953	0.02278	0.02566	3.8976
RUN 11-3	28.5909	0.00067	14.00	30.00	4.2857	34.0368	0.00805	236870.328	0.2904	0.02096	0.02644	4.0364
RUN 12-1	32.7757	0.00146	11.80	29.15	5.0847	46.2934	0.00819	266739.949	0.4303	0.01769	0.02930	4.4800
RUN 12-2	32.7757	0.00067	12.00	27.75	5.0000	45.5218	0.00844	258954.812	0.4196	0.00267	0.02566	3.8069

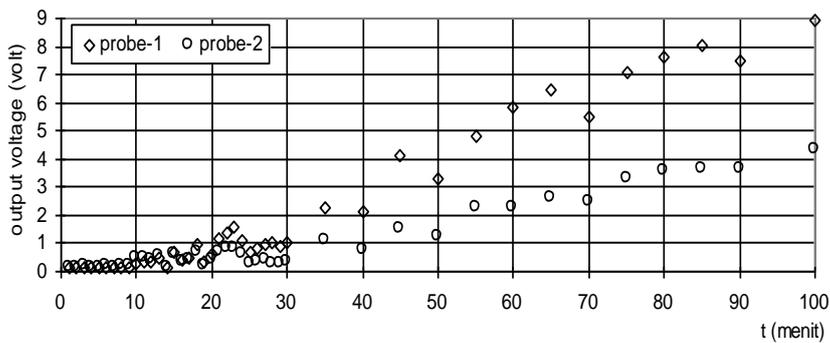
So - slope dasar saluran; t - suhu air; Q - debit aliran terukur; H - kedalaman aliran; b/H-aspect ratio; b - lebar flume (= 60 cm); U - kecepatan aliran rata-rata tampang; v - viskositas kinematik (fungsi suhu); $Re = 4 U H/v$ - Reynolds number; $Fr = U / \sqrt{gH}$ - Froude number; $Ca = 0.015D_{50}/a T^{1.5}/D_s^{0.3}$ - konsentrasi referensi; g-percepatan gravitasi; $D_s = D50\{1+0.011(\sigma_s - 1)(T-25)\}$ - diameter partikel suspensi representatif; $\sigma_s = 0.5(D84/D50 + D50/D16)$ -standar deviasi geometrik; T-parameter angkutan; w_s - kecepatan jatuh partikel; untuk $D_s < 100 \mu m$ - $w_s = 1/18 (s-1)gD_s^2/v$; $100 \leq D_s \leq 1000 \mu m$ - $w_s = 10v/D_s \left\{ \left[1 + 0.01(s-1)gD_s^3/v^2 \right]^{0.5} - 1 \right\}$; $D_s > 1000 \mu m$ - $w_s = 1.1 [(s-1)gD_s]^{0.5}$; s-spesifik density.

Comment [BILA2]:

Untuk membangkitkan terjadinya sedimen suspensi, maka pada dasar flume dilapisi dengan pasir setebal 20 cm sebagai material dasar, mempunyai rapat massa 2.57 gr/cm^3 , untuk mengetahui ukuran partikel-partikel *material bed* dilakukan analisa butiran (*gradasi non-uniform*) hasilnya sebagai berikut ; $d_{16} = 0.016 \text{ cm}$, $d_{35} = 0.036 \text{ cm}$, $d_{50} = 0.048 \text{ cm}$, $d_{84} = 0.125 \text{ cm}$, dan $d_{90} = 0.14 \text{ cm}$. Kondisi partikel angkutan sedimen untuk *bed load* dan *suspended load* pada kenyataannya mempunyai ukuran yang berbeda, partikel *suspended load* lebih kecil dibandingkan dengan partikel *bed load*, dan sangat tergantung kepada kondisi alirannya. Untuk menghitung besarnya diameter partikel sedimen suspensi yang representatif (D_s), dapat dihitung berdasarkan data-data partikel material bed dengan menggunakan pendekatan Einstein, diameter partikel suspensi yang mewakili D_s mempunyai korelasi dengan d_{50} dan koefisien σ_s (standar deviasi geometrik). Dari data material bed yang telah dianalisa butirannya, maka diperoleh angka standar deviasi geometrik yaitu $\sigma_s = 0.5(d_{84}/d_{50} + d_{50}/d_{16}) = 2.802$, sehingga untuk 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 ini dihitung dengan persamaan $D_s = d_{50} \{1 + 0.011(\sigma_s - 1)(T-25)\}$, untuk kondisi aliran tertentu pada saat running di flume, nilai diameter partikel suspensi yang representatif, D_s untuk tiap running aliran yang dikerjakan bervariasi antara 0.0246 - 0.0363 cm, sehingga jelas bahwa diameter partikel suspensi akan lebih kecil dari partikel material dasar.

B. Data Pengukuran

Data pengukuran adalah array data digital berupa analog voltage yang merupakan output dari masing-masing sensor, disimpan dalam direktori dan file tertentu oleh suatu program yang dibuat dalam LabVIEW, program yang dibuat menggunakan **Bahasa "G"** (*Graphical language for programming*). Data tersebut merupakan data mentah (*raw data*) dalam satuan *volt*, sehingga untuk mendapatkan besaran kecepatan dan konsentrasi pada titik pengukuran diperlukan formula konversi seperti yang telah diuraikan pada bagian kalibrasi.



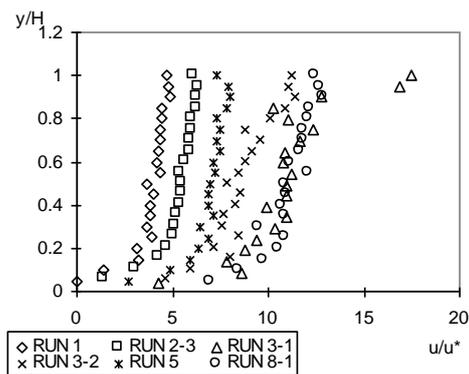
Gambar 4.1 Seri waktu pengukuran Foslim probe.

Pada Gambar 4.1 menunjukkan karakter alat Foslim pada saat test sebelum dipakai untuk pengukuran, test dilakukan dengan mengukur pada satu titik yang tetap serta kondisi aliran yang sudah stabil, maksud diadakan test pengukuran yang merupakan serial waktu ini adalah untuk mengetahui konsistensi alat dalam menangkap fenomena sedimen suspensi. Pada keadaan 30 menit pertama alat tidak menunjukkan kenaikan nilai pengukuran, namun berikutnya hingga waktu mencapai 100 menit pembacaan sudah tidak konsisten terhadap pembacaan semula, ada kenaikan nilai pembacaan. Kemungkinan penyebabnya adalah adanya pengaruh panas pada elemen-elemen rangkaian dalam sensor, dengan demikian untuk keperluan pengukuran dilakukan tidak lebih dari 30 menit, setelah itu alat didinginkan dan kemudian dapat dipakai mengukur lagi.

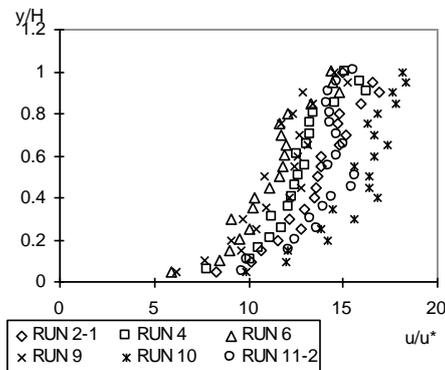
C. Profil Kecepatan

Profil kecepatan yang diukur pada kondisi aliran uniform untuk beberapa variasi parameter aliran diperlihatkan pada Gambar 4.2. Pengukuran dilakukan pada posisi 600 cm dari flume entrance setelah kondisi aliran dalam keadaan stabil, artinya tidak terjadi perubahan terutama pada parameter kedalaman aliran selama pengukuran berlangsung. Hasil pengukuran kecepatan pada tampang arah vertikal dinormalisasi dengan kecepatan geser u_* yang diperoleh dengan metode Clauser. Variasi parameter

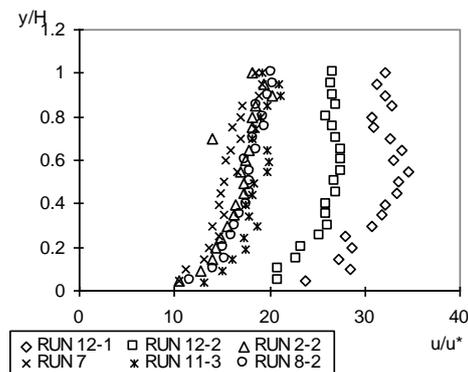
aliran terutama dilakukan pada besarnya debit (Q), kemiringan dasar saluran (S_0) dan kedalaman aliran (H). Dari beberapa variasi parameter aliran, seperti tertera pada tabel 4.1 diketahui bahwa aliran selama melakukan pengukuran adalah bersifat aliran sub-kritis ($Fr < 1$) dan turbulen ($Re > 12500$). Pada Gambar 4.2 (a) untuk seri aliran RUN 12-1 (debit terbaca 31 lt/det; slope 0.00146 dan kedalaman aliran 11.8 cm) merupakan seri aliran yang memiliki nilai kecepatan cukup besar dibandingkan dengan running lainnya, dan seri aliran RUN 1 (debit terbaca 11 lt/det; slope 0.00183 dan kedalaman aliran 11.5 cm) merupakan nilai terkecil dalam seri tersebut. Ketidakteraturan bentuk profil kecepatan pada seri aliran RUN 12-1 kemungkinan disebabkan pengaruh kekasaran dasar yang berubah selama pengukuran, dari catatan data pengamatan setelah aliran dihentikan terlihat adanya perubahan konfigurasi dasar (*riple* dengan ukuran rata-rata panjang 6.5 cm dan tinggi 0.4 cm). Sedangkan pada seri aliran RUN 3-1 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*.



(a)



(b)

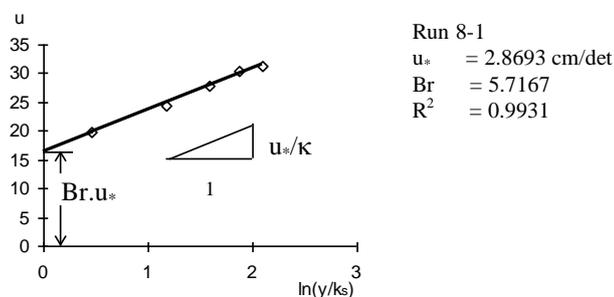


(c)

Gambar 4.2 Profil distribusi kecepatan untuk beberapa variasi parameter aliran.

Dari masing-masing profil kecepatan hasil pengukuran ini dapat diperoleh nilai kecepatan geser, u_* pada dasar untuk tiap seri aliran, sehingga u_* dapat dipakai untuk menormalisasi dalam plotting profil kecepatan seperti pada Gambar 4.2 dan intensitas turbulen, tujuan normalisasi adalah untuk membandingkan beberapa data dalam satu tampilan dan membandingkan berbagai kondisi aliran. Nilai u_* dipakai untuk menormalisasi profil kecepatan, karena distribusi kecepatan sangat dipengaruhi oleh kekasaran dasar k_s , pada eksperimen ini material dasar adalah material non-koheusif yang mudah bergerak, pada kondisi aliran tertentu dapat menyebabkan terjadi perubahan konfigurasi dasar, pada prinsipnya konfigurasi dasar terbentuk sebagai hasil

gesekan pada dasar, sehingga logis menggunakan nilai kecepatan gesek u_* sebagai parameter untuk menormalisasi distribusi kecepatan. Ada beberapa metode untuk perhitungan kecepatan geser yaitu ; Clauser's method, Energy-gradient method, Reynolds-stress method, Profil kecepatan rata-rata dalam viscous sublayer dan Pengukuran langsung (B.A. Kironoto, 1993). Dalam pembahasan ini digunakan salah satu metoda, yaitu Metoda Clauser. Metode ini dalam perhitungan u_* dengan 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 $y/\delta \leq 0.2$), data u hasil pengukuran di wilayah dalam diplotkan terhadap nilai $\ln(y/k_s)$, kemudian dengan teknik pencocokan kurva (*least square fitting*) nilai kecepatan geser u_* dan nilai konstanta integrasi Br akan diperoleh (dengan asumsi $\kappa = 0.4$), untuk nilai u_*/κ adalah sama dengan kemiringan kurva hasil pencocokan (*fitting curve*) dan $Br \cdot u_*$ adalah titik potong kurva dengan ordinatnya. Salah satu hasil perhitungan seperti pada Gambar 4.3 berikut.



Gambar 4.3 Perhitungan u_* dan Br dengan Metode Clauser's.

Untuk lengkapnya perhitungan u_* dapat dilihat pada tabel 4.2, selanjutnya perhitungan dicoba dibandingkan dengan *Energy-Gradient method*. Pada metoda ini kecepatan geser u_* dihitung dengan $u_{*eg} = (g H Se)^{0.5}$, dalam persamaan ini Se adalah kemiringan garis energi (*energy slope*), dan diambil sama dengan kemiringan dasar saluran (So).

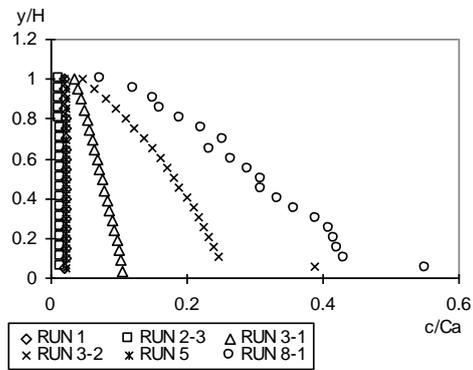
Tabel 4.2 Perbandingan hitungan u_* metode *Clauser's* dengan *Energy Gradient*

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

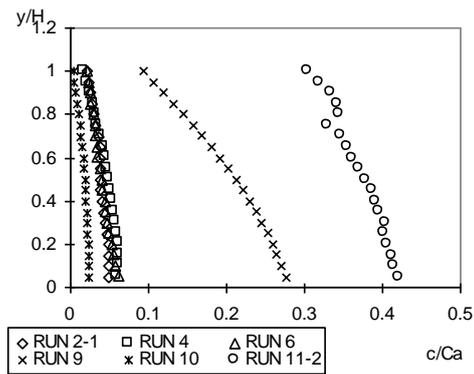
Hasil perhitungan u_{*eg} pada umumnya memperlihatkan nilai kesalahan yang besar terhadap u_* dari hasil hitungan metode Clauser, hal ini memberikan implikasi bahwa perkiraan Se sama dengan So adalah kurang tepat untuk beberapa kasus seri aliran, karena pada dasar saluran dalam penelitian ini merupakan material yang mudah berubah seperti mengalami degradasi dan aggradasi serta perubahan konfigurasi dasar (walaupun hanya terbentuk *flat bed*) akibat alirannya, maka kemungkinan besar garis kemiringan energi tidak akan sama dengan kemiringan dasar saluran setelah aliran dihentikan. Namun untuk kasus seri aliraran RUN 2-3, RUN 3-2, RUN 4, RUN 5, dan RUN 11-2 yang menunjukkan kesalahan relatif kurang dari 10 % tidak banyak mengalami perubahan yang besar.

D. Konsentrasi Sedimen Suspensi

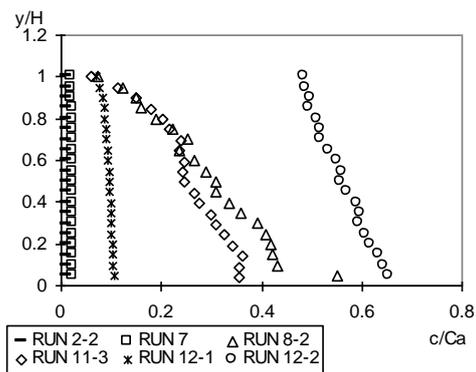
Posisi pengukuran kecepatan aliran dan konsentrasi sedimen suspensi terletak pada titik yang sama dalam arah longitudinal, diletakkan pada *centre line* sehingga diharapkan data yang diperoleh mempunyai karakter aliran pada waktu yang sama.



(a)



(b)



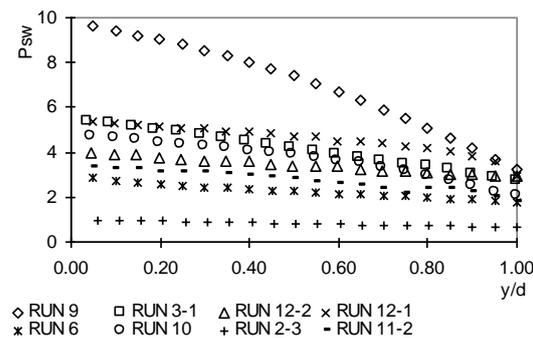
(c)

Gambar 4.4 Profil konsentrasi sedimen suspensi hasil pengukuran.

Pada Gambar 4.4 memperlihatkan profil konsentrasi sedimen suspensi hasil pengukuran di laboratorium untuk tiap-tiap running seri aliran. Konsentrasi sedimen suspensi pada wilayah dekat dasar lebih besar bila dibandingkan dengan konsentrasi di permukaan, sehingga pada wilayah dekat dasar energi per satuan waktu atau daya yang diperlukan untuk mempertahankan partikel-partikel agar senantiasa berada dalam kondisi tersuspensi cukup besar. Dapat dipahami dari profil distribusi kecepatan hasil pengukuran (pada Gambar 4.2), 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. Sedangkan 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 Gambar 4.4 (a), (b) dan (c) adalah tiga pengelompokan gambar yang mempunyai karakter sama dengan gambar profil kecepatan {Gambar 4.2 (a), (b) dan (c)}, dari ketiga fenomena hasil pengukuran profil konsentrasi sedimen suspensi terdapat profil distribusi konsentrasi sedimen suspensi yang memiliki sebaran relatif seragam, misal pada Gambar 4.4 (a) yaitu RUN 1, RUN 2-3 dan RUN 5 tampak berdistribusi seragam, bila diamati dari profil kecepatan bahwa untuk ketiga seri aliran ini memiliki distribusi kecepatan yang relatif kecil, sehingga keseragaman sebaran partikel-partikel sedimen suspensi ini akibat kecepatan yang kecil, kemudian energi yang diperlukan untuk mempertahankan partikel agar senantiasa tersuspensi menjadi kecil. Daya (energi per satuan waktu) yang ditimbulkan akibat adanya turbulensi aliran dan kecepatan jatuh partikel akan berbeda untuk tiap kondisi aliran, dengan demikian daya yang diperlukannya akan berbeda pula. Besarnya daya untuk tiap titik tertentu pada arah vertikal akan berbanding lurus dengan bertambahnya konsentrasi sedimen

suspensi, kenyataan ini seperti yang telah diformulasikan oleh Vanoni dalam persamaan $P_{sw} = (1 - \gamma/\gamma_s) w_s g \int_0^H c dy$, untuk suatu kolom zat cair pada kedalaman aliran tertentu. Kecenderungan akan adanya peredaman turbulensi akibat adanya konsentrasi sedimen suspensi ini bisa terjadi, karena seperti yang telah dijelaskan di atas bahwa turbulensi tersebut digunakan sebagai energi untuk mempertahankan partikel agar tersuspensi. Distribusi daya yang diperlukan untuk mempertahankan kondisi partikel-partikel tersebut diperlihatkan pada Gambar 4.5. Implikasi secara fisik dapat terlihat bahwa partikel-partikel sedimen suspensi sepanjang saluran akan bertahan dalam kondisi tersuspensi.



Gambar 4.5 Distribusi daya turbulensi.

Pada posisi dasar saluran, sedimen yang terjadi adalah lebih merupakan *bed load* dari pada *suspended load*, namun secara teoritis bila melihat formulasi distribusi sedimen suspensi yang dikembangkan oleh Rouse, pada posisi dasar yaitu nilai $y = 0$, maka akan menghasilkan nilai konsentrasi sedimen suspensi yang tak terhingga, hal ini tidaklah memungkinkan untuk fenomena angkutan pada saluran yang dapat diukur, serta dalam ruang dan dimensi yang terbatas. Fenomena ini akan memberikan permasalahan tersendiri untuk dapat mengungkapkan pada batas mana bahwa kondisi angkutan itu *bed load* dan *suspended load*. 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 akan menjadi kurang akurat bila dasar saluran

membentuk formasi tertentu, oleh karena itu 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*, sehingga konsentrasi disini dikatakan sebagai konsentrasi acuan (*reference of concentration-Ca*).

Pada penelitian ini level acuan dicoba dirumuskan kembali dengan mengacu pada data-data hasil pengukuran di laboratorium, level acuan dihitung berdasarkan pada persamaan $\ln \frac{C}{C_a} = -w_s / \epsilon_s (y - a)$ dengan koefisien difusi ϵ_s sebagaimana telah dihitung dari hasil pengukuran distribusi konsentrasi. Dari persamaan tersebut perhitungan level acuan **a** ini hanya dilakukan untuk kedalaman y (z) pada dasar saja, dan hasilnya seperti pada tabel 4.3 berikut ini.

Tabel 4.3 Perhitungan level acuan

seri aliran (-)	Ca (gr/cm ³)	y (cm)	ws (cm/det)	H (cm)	ϵ_s (gr/cm.det)	a (cm)	a/H (-)
RUN 3-1	0.035761	0.554	4.6888	15.50	0.1197	0.4813	0.0310
RUN 3-2	0.012123	0.554	4.3139	9.40	0.0221	0.5492	0.0584
RUN 9	0.067393	0.554	4.3139	11.29	0.1490	0.4540	0.0402
RUN 6	0.014407	0.554	4.2492	11.00	0.0426	0.5256	0.0478
RUN 5	0.031706	0.554	4.7929	11.80	0.4264	0.1547	0.0131
RUN 7	0.031317	0.554	4.8850	12.00	0.3345	0.2532	0.0211
RUN 2-3	0.048453	0.554	5.0093	9.40	0.1955	0.3590	0.0382
RUN 2-2	0.059788	0.554	5.5924	12.70	0.2281	0.3386	0.0267
RUN 10	0.023468	0.554	5.3685	11.95	0.1570	0.4691	0.0392
RUN 11-2	0.022783	0.554	3.8976	11.38	0.1651	0.4347	0.0382
RUN 11-3	0.020960	0.554	4.0364	13.85	0.0444	0.5113	0.0369
RUN 12-2	0.002668	0.554	3.8069	11.95	0.1506	0.5373	0.0449
RUN 12-1	0.017693	0.554	4.4799	11.76	0.1385	0.4867	0.0414
RUN 8-1	0.033279	0.554	4.7414	11.48	0.4704	0.2573	0.0224
RUN 8-2	0.023689	0.554	3.8678	11.95	0.0363	0.5297	0.0443
RUN 2-1	0.029673	0.554	4.9353	11.95	0.1213	0.4824	0.0404
RUN 4	0.025371	0.554	3.7138	10.00	0.6688	0.0489	0.005
						mean	0.0347
						stdev.	0.0134

Hasil perhitungan di atas menunjukkan bahwa level acuan **a** dapat didekati dari hasil rata-rata perhitungan sebesar $0.0347H$ atau $0.035H$ dengan standard deviasi 0.01 (H adalah kedalaman aliran). Nilai ini lebih besar dari nilai minimum yang disyaratkan

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

Perhitungan untuk menentukan posisi nilai konsentrasi sedimen suspensi rata-rata disajikan pada tabel 4.5 untuk dua posisi pengukuran yang diperlukan, yaitu pengukuran pada satu titik dan pengukuran pada dua titik.

Penentuan posisi satu titik diperoleh dengan mencocokkan nilai konsentrasi sedimen suspensi rata-rata hasil pengukuran \bar{C} dengan data hasil pengukuran distribusi konsentrasi sedimen suspensi, kemudian tetapkan dengan nilai \bar{C} tersebut berada pada kedalaman berapa dan dibagi dengan kedalaman aliran (H) maka posisi untuk pengukuran satu titik tersebut diperoleh. Dari tabel di atas diperoleh nilai rata-rata untuk pengukuran satu titik adalah pada $\bar{C} = C_{0.6H}$ dengan standar deviasi 0.098, sedangkan penentuan posisi pengukuran untuk dua titik dari data pengukuran tersebut diperoleh dengan cara yang sama dengan satu titik, hanya \bar{C} disini diperlakukan untuk dua titik. Dari sejumlah 18 data seri aliran diperoleh bahwa nilai konsentrasi sedimen suspensi rata-rata untuk pengukuran dua titik adalah $\bar{C} = \frac{1}{2} (C_{0.24H} + C_{0.86H})$, 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.

Tabel 4.5 Perhitungan posisi nilai konsentrasi rata-rata pengukuran

Seri (-)	Nilai c pada 2 titik (gr/l)		$\bar{C}_{2\text{titik}}$ (gr/l)	$\bar{C}_{\text{pengukuran}}$ (gr/l)	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

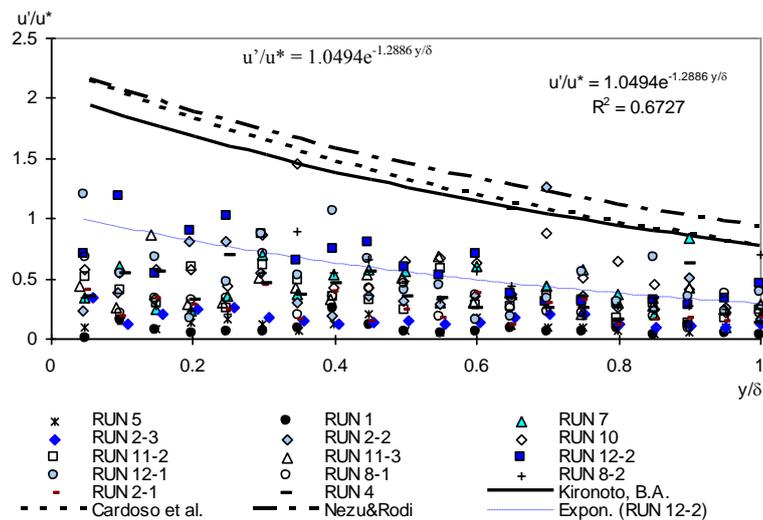
RUN 2-1	1.5402	0.8554	1.1978	1.2085	0.89	0.675 H	0.25 H	0.89 H
RUN 2-2	0.6703	0.6417	0.6560	0.6312	3.94	-	0.2 H	0.8 H
RUN 2-3	0.6809	0.6418	0.6613	0.6301	4.96	-	0.355 H	0.9 H
RUN 3-1	1.8908	0.7783	1.3345	1.3205	1.06	0.6 H	0.188 H	0.95 H
RUN 3-2	2.8102	0.9799	1.8950	1.9085	0.70	0.62 H	0.2 H	0.9 H
RUN 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

E. 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, dan hal ini yang menjadi persoalan penting dalam mempelajari fenomena angkutan sedimen suspensi. Pada arah vertikal dari dasar, intensitas turbulen lebih besar dibandingkan dengan intensitas turbulen pada dekat permukaan, sehingga akumulasi partikel sedimen suspensi berada di bagian dasar. Pada daerah dekat permukaan intensitasnya kecil, yang dominan adalah kecepatan jatuh partikel yang dipengaruhi juga oleh gaya beratnya sendiri, sehingga konsentrasi di daerah ini relatif lebih kecil dibandingkan dengan di dasar. Intensitas turbulen arah vertikal merupakan *Root Mean Square* nilai fluktuasi kecepatan arah vertikal, demikian pula dengan intensitas turbulen arah longitudinal, yang merupakan *Root Mean Square* (RMS) nilai fluktuasi kecepatan pada arah horizontal, dirumuskan

sebagai $u' = \sqrt{\sum_{i=1}^N (u_i - u)^2 / (N-1)}$. Gambar 4.6 berikut menunjukkan intensitas

turbulen arah horizontal dari beberapa seri running aliran, sedangkan untuk intensitas turbulen arah vertikal dalam penelitian ini tidak dilakukan pengukuran.



Gambar 4.6 Intensitas turbulen arah longitudinal.

Intensitas turbulen hasil pengukuran dicoba dibandingkan dengan persamaan-persamaan yang telah ada dari hasil penelitian, diantaranya yang dikemukakan oleh Nezu and Rodi (1986) ; $\frac{u'}{u_*'} = 2.26e^{-0.88y/\delta}$ yang berlaku untuk batas halus dan kasar (*smooth and rough boundaries*). Sedangkan hasil penelitian yang dikemukakan oleh Kironoto, B.A. (1993) memberikan persamaan intensitas turbulen untuk batas kasar (*rough boundaries*) dan dasar *fix bed* pada aliran air jernih adalah $\frac{u'}{u_*'} = 2.04e^{-0.97y/\delta}$, kedua persamaan pembanding tersebut seperti tertera pada Gambar 4.6 yang menunjukkan bahwa sebagian besar data hasil pengukuran berada di bawah kedua persamaan pembanding tersebut, kecuali pada seri aliran RUN 3-1, RUN 3-2, RUN 9 dan RUN 6 berada di atas kedua persamaan pembanding, hasil pengukuran konsentrasi sedimen suspensi memberikan informasi bahwa konsentrasi sedimen suspensi rata-rata untuk seri aliran RUN 3-1, RUN 3-2 dan RUN 9 adalah relatif besar bila dibandingkan dengan seri aliran lain, kemungkinannya bahwa pada seri aliran tersebut disertai dengan terjadinya angkutan dasar yang besar dan pola pergerakan

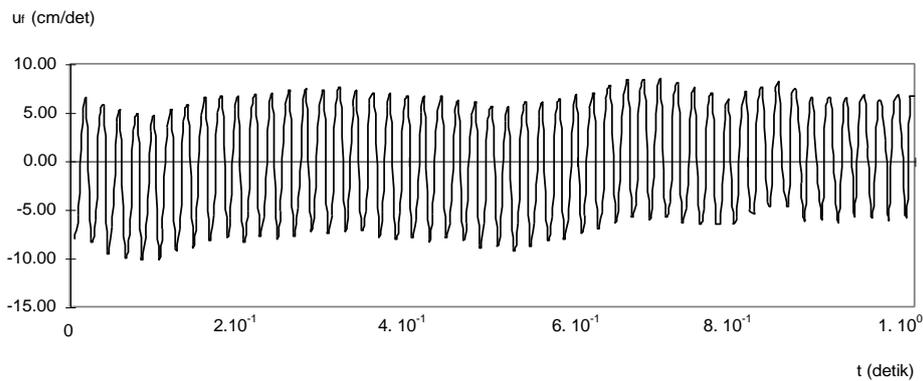
partikel pada dasar ini dapat mempengaruhi karakter turbulen sehingga akan mempengaruhi pada keseluruhan kedalaman, sebagaimana diungkapkan oleh Wang Z. dan Larsen P. (1994) jika partikel bergerak sebagai *bed load* akan meningkatkan turbulensi, implikasinya bahwa jika konsentrasi sedimen suspensi tersebut pekat dapat meningkatkan intensitas turbulen demikian pula jika konsentrasi tersebut rendah intensitas turbulen berkurang dari kondisi *clear water*. Keberadaan intensitas turbulen yang kecil ini mempunyai korelasi dengan distribusi konsentrasi sedimen suspensi, sebagaimana terlihat pada Gambar 4.4 (a) bahwa pada seri aliran RUN 1 distribusi sedimen suspensi lebih seragam dan konsentrasinya relatif kecil dibandingkan dengan seri aliran lainnya.

Sebagaimana yang telah diungkapkan oleh Nezu (1977) 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 $D_1 = 1.0494$ dan $\lambda_1 = 1.2886$, sehingga persamaan intensitas turbulen untuk aliran bermuatan sedimen dengan dasar bergerak (*movable bed*) menjadi $\frac{u'}{u_*'} = 1.0494 e^{-1.2886 y/\delta}$ dengan koefisien korelasi $r = 0.82$. Hasil pengukuran intensitas turbulensi ini relatif lebih kecil dibandingkan dengan formulasi hasil penelitian terdahulu, hal ini menunjukkan bahwa terdapat reduksi (*damping*) turbulensi fluida oleh partikel-partikel sedimen suspensi.

Untuk aliran bermuatan sedimen ini pada arah longitudinal intensitas turbulen bervariasi, sehingga trace partikel mulai dari hulu hingga ke hilir berubah, akan mengikuti turbulensi aliran sesuai dengan intensitasnya dimana posisi partikel tersebut berada. Intensitas turbulen dari beberapa seri running aliran menunjukkan variasi pada daerah dekat dengan dasar, dari profil konsentrasi sedimen suspensi diketahui bahwa pada dasar konsentrasi sedimen suspensi lebih besar dari kondisi di permukaan, jadi hasil pengukuran menunjukkan bahwa dengan bertambahnya konsentrasi sedimen suspensi maka intensitas turbulen cenderung menurun.

Pada Gambar 4.7 berikut menggambarkan fluktuasi kecepatan pada salah satu titik di permukaan untuk seri aliran RUN 9 yang diperoleh dari hasil pengukuran. Dalam pengambilan data, satu detik terbaca 200 data atau laju pembacaan data (*scan*

rate) adalah 200 scan/detik. Fluktuasi kecepatan ini diperoleh dengan mengurangkan kecepatan sesaat dengan kecepatan rata-rata titik pada satu titik pengukuran yang bersangkutan ($u_f = u_i - u$). Fluktuasi ini menunjukkan bahwa gerakan partikel pada satu titik pengukuran berubah terhadap waktu, besar dan arahnya juga berubah, menunjukkan bahwa aliran tersebut adalah bersifat turbulen.

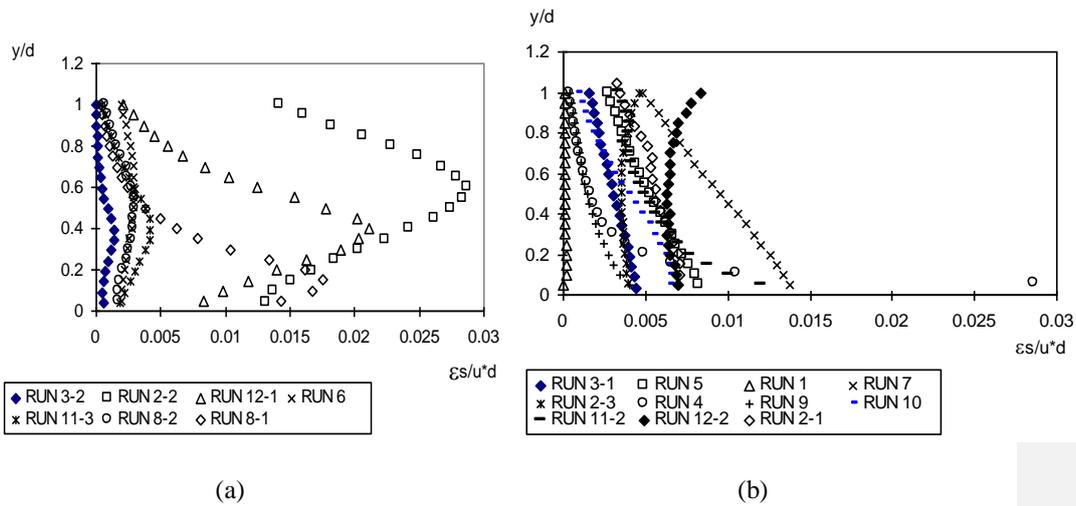


Gambar 4.7 Fluktuasi kecepatan arah longitudinal

F. Koefisien Diffusi Sedimen Suspensi

Lane dan Kalinske menyatakan bahwa koefisien diffusi untuk sedimen suspensi (ϵ_s) tidaklah konstan, melainkan bervariasi terhadap kedalaman sesuai dengan hasil eksperimennya. Namun anggapan yang digunakan oleh Schmidh sebelumnya dinyatakan bahwa ϵ_s adalah konstan pada arah vertikal. Bertolak dari dua pernyataan yang saling kontroversi ini, maka pada penelitian ini ϵ_s dikaji dengan menggunakan data hasil pengukuran sedimen suspensi di laboratorium. Hasil pengukuran konsentrasi tersebut dapat diaplikasikan kedalam bentuk persamaan matematis untuk profil konsentrasi sedimen suspensi yang dipengaruhi oleh diffusi, sebagaimana yang telah diekspresikan dalam persamaan terdahulu, yaitu $w_s C + \epsilon_s \frac{dC}{dy} = 0$. Dengan diketahuinya beberapa parameter seperti diameter partikel sedimen suspensi yang representatif, viskositas, rapat massa butiran, konsentrasi sedimen suspensi lokal $c(y)$, maka hanya satu parameter ϵ_s yang belum diketahui dari persamaan tersebut, sehingga ϵ_s dapat diketahui distribusinya. Nilai dC/dy dapat diperoleh dari profil konsentrasi sedimen suspensi hasil pengukuran,

dengan teknik fitting curve (metode least square) maka dC/dy diperoleh. Untuk beberapa seri running aliran hasilnya dipresentasikan pada Gambar 4.8 di bawah ini.

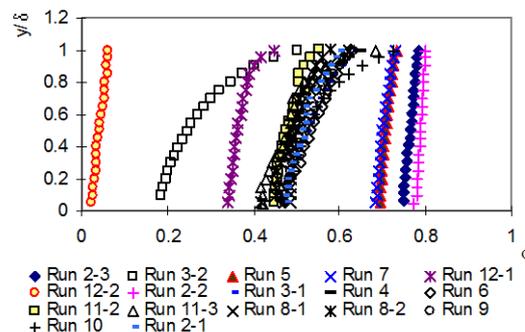


Gambar 4.8 Koefisien diffusi sedimen suspensi.

Dengan demikian jelas bahwa ϵ_s bervariasi terhadap kedalaman dan pada gambar di atas nilai ϵ_s diperoleh dalam dua jenis *trend*, yaitu distribusi ϵ_s yang mengikuti trend parabolic non-simetris (Gambar 4.8.a) dan distribusi ϵ_s yang mengikuti trend linier dan atau power (Gambar 4.8.b). Pada Gambar 4.8.a distribusi ϵ_s menunjukkan peningkatan mulai dari dasar hingga mencapai nilai maksimum pada perkiraan setengah kedalaman, dan setelah itu berkurang menuju nilai minimum hingga di permukaan aliran, kemudian pada Gambar 4.8.b distribusi ϵ_s adalah seragam untuk yang berdistribusi linier dengan peningkatan dari dasar hingga ke permukaan air. Kecenderungan penyebarannya hampir sama dengan koefisien diffusi untuk fluida, yaitu membentuk suatu kurva parabolik. Namun hasil pengukuran ini bentuk kurva paraboliknya tidak simetris, yang menunjukkan kemungkinan adanya faktor redaman pada kedalaman tertentu.

G. 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). Dari Gambar 4.9 diketahui bahwa kehadiran partikel-partikel sedimen suspensi berpengaruh terhadap turbulensi fluida, yaitu dengan mengamati nilai $\phi < 1$ untuk setiap seri aliran, hal ini menunjukkan bahwa terjadi redaman untuk setiap aliran yang bermuatan sedimen.



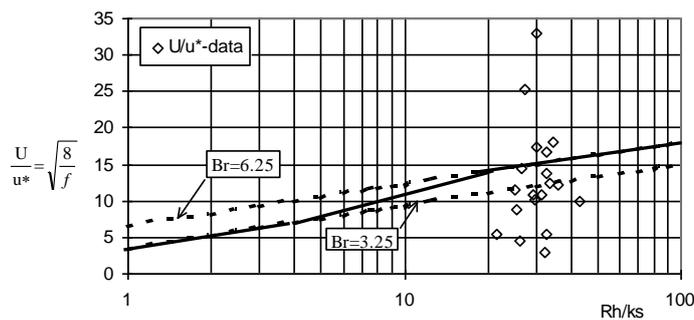
Gambar 4.9 Damping turbulensi fluida oleh partikel sedimen suspensi.

H. Resistansi Aliran

Pada aliran *steady uniform* dengan kekasaran dasar tertentu, resistansi aliran diungkapkan dengan hubungan antara kekasaran relatif, Rh/ks dengan koefisien resistansi, f yang didefinisikan oleh Graf *et al.*(1994) sebagai $f = 8(u^*/U)^2$ dengan U adalah kecepatan rata-rata tampang, u^* kecepatan geser dan f adalah faktor gesekan dari Darcy-Weisbach. Persamaan resistansi aliran yang biasa digunakan diekspresikan dalam bentuk $\frac{U}{u^*} = \sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{Rh}{ks} + \overline{Br}$, dengan Rh adalah radius hidraulik, diambil nilai $\overline{Br} = 6.25$ untuk kekasaran relatif yang kecil ($Rh/ks > 20$) dan $\overline{Br} = 3.25$ untuk nilai kekasaran relatif yang besar ($Rh/ks < 4$), antara nilai-nilai tersebut terdapat wilayah transisi ($4 < Rh/ks < 20$). Bentuk persamaan tersebut diplot pada Gambar

4.10 bersama-sama dengan data yang ada. Data hasil eksperimen ternyata berada pada wilayah dengan kekasaran relatif yang kecil ($Rh/ks > 20$).

Hasil eksperimen dari Lau, Y.L (1982) dengan membandingkan dua kondisi aliran untuk *clear water* dan aliran bermuatan sedimen untuk *flow resistance* yang dipresentasikan kedalam profil kecepatan, menunjukkan bahwa dengan hadirnya partikel-partikel suspensi, maka *flow resistance* menjadi berkurang, untuk dua aliran dengan debit dan *slope* yang sama menunjukkan bahwa aliran dengan sedimen suspensi kecepatannya akan berkurang pada wilayah dekat dasar dan kecepatan menjadi lebih besar jauh dari wilayah batas bila dibandingkan dengan kondisi *clear water*.



Gambar 4.10 Resistansi aliran.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Dari hasil pengukuran distribusi sedimen suspensi pada saluran terbuka, dapat disimpulkan beberapa hal penting diantaranya :

1. Untuk memperoleh nilai konsentrasi sedimen suspensi rata-rata pada saluran terbuka aliran dua dimensi uniform dapat dilakukan dengan pengukuran satu titik

yaitu pada $\bar{C} = C_{0.6H}$, sedangkan untuk pengukuran dua titik dapat dihitung dengan $\bar{C} = \frac{1}{2} (C_{0.24H} + C_{0.86H})$, dengan H , $C_{0.6H}$, $C_{0.24H}$ dan $C_{0.86H}$ berturut-turut adalah kedalaman aliran, nilai konsentrasi sedimen suspensi pada kedalaman 0.6 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 $a = 0.035 H$ 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 awalnya laminar akan berubah menjadi turbulen, sehingga total kedalaman aliran menjadi turbulen.
5. Koefisien difusi sedimen suspensi ϵ_s bervariasi terhadap kedalaman, pada setengah kedalaman bagian bawah ϵ_s mengalami peningkatan hingga mencapai titik maksimumnya, kemudian pada setengah kedalaman bagian atas ϵ_s berkurang sampai mencapai nilai minimum pada permukaan aliran.
6. Kehadiran partikel-partikel sedimen suspensi pada aliran bermuatan sedimen dapat meredam turbulensi aliran fluida (*damping effect*).

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. 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.
3. Karakteristik turbulen dengan angkutan dasar (*bed load*) perlu diteliti, mengingat pengaruh *suspended load* dan *bed load* pada karakteristik turbulen berbeda.