

# KARAKTERISTIK ALIRAN TIDAK SERAGAM DENGAN SEDIMEN SUSPENSI PADA SALURAN TERBUKA

## THE CHARACTERISTIC OF NON-UNIFORM FLOW WITH SUSPENDED SEDIMENT IN OPEN CHANNEL

Bambang Agus Kironoto<sup>1)</sup>, Lutjito<sup>2)</sup>, Dwi Handaya Nugraha<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Staf pengajar Jurusan Teknik Sipil dan Pascasarjana, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada  
Jl. Grafika 2 Yogyakarta; email : [kironoto12117@yahoo.co.id](mailto:kironoto12117@yahoo.co.id)

<sup>2)</sup> Alumni Program S2 Teknik Sipil UGM; sekarang staf pengajar di Fakultas Teknik, UNY, Yogyakarta

<sup>3)</sup> Alumni Program S2 Teknik Sipil; sekarang bekerja sebagai Konsultan Teknik

### ABSTRACT

*The suspended sediment phenomenon has a close relationship with the water system in a river. The complexity of suspended sediment phenomenon, as well as the turbulence and non-uniformity of flow will cause differences characteristics from the uniform flow condition. The characteristics of suspended sediment of non-uniform open channel flow were studied using experimental method, by taking a direct measurement in the sediment-recirculating flume at the Hydrology and Hydraulic Laboratory of PS-IT UGM. The optical silt measuring instruments of Foslum-probe type was used for measuring the concentration distribution of the suspended sediment. While to measure the velocity distribution, electromagnetic flow meter probe set of VM-201H type combined with the vector calculation equipment of DV-101 type were used. Fifty series of measurements, which comprise of eighteen series of uniform flows, eighteen series of non-uniform decelerated flows, and fourteen series of non-uniform accelerated flows were obtained in this study. The result of this study shows that the integration constant value of the logarithmic-law, stated as  $Br$ , tends to be smaller than the  $Br$ -value of clear water. The  $Br$ -value tend to increase with the increasing of pressure gradient value of non-uniform flow,  $\beta n$ . The Coles wake parameter,  $\Pi$ , shows a similar trend with the  $Br$ -value, in which, the  $\Pi$ -value tend to increase with the increasing of  $\beta n$ -value. The equation of Rouse, as well as, the equation of Tanaka and Sugimoto for uniform flow can predict the sediment concentration distributions of non uniform flow data satisfactory.*

Keywords : *accelerated and decelerated non-uniform flows, velocity and suspended sediment distributions.*

### PENDAHULUAN

#### Latar Belakang

Transpor sedimen suspensi dapat terjadi pada berbagai macam aliran, baik pada aliran saluran terbuka maupun pada aliran saluran tertutup, dan fenomenanya sangat kompleks. Transpor sedimen suspensi pada sungai, dapat terjadi pada aliran seragam maupun aliran tidak seragam. Aliran tidak seragam sendiri dapat berupa aliran tidak seragam yang dipercepat dan aliran tidak seragam yang diperlambat. Aliran di hulu bangunan terjunan, atau aliran di hulu bangunan bendung atau bangunan bendungan adalah merupakan contoh-contoh aliran tidak seragam yang dipercepat dan diperlambat.

Karakteristik aliran seragam dan tidak seragam diketahui relatif berbeda. Untuk aliran air jernih, Cardoso dkk (1989), Kironoto (1993), dan Kironoto dan Graf (1995) telah melakukan penelitian cukup mendalam tentang karakteristik aliran tidak seragam pada saluran terbuka, dan diketahui bahwa disamping adanya beberapa persamaan antara aliran seragam dengan aliran tidak seragam, ada beberapa perbedaan yang cukup signifikan. Disamping itu juga

disampaikan bahwa persamaan distribusi kecepatan logaritmik dan Coles masih dapat digunakan pada aliran tidak seragam.

Coleman (1981; 1986), melaporkan bahwa adanya sedimen suspensi diketahui mempengaruhi bentuk distribusi kecepatan, meskipun masih mengikuti bentuk distribusi kecepatan logaritmik. Parameter Coles,  $\Pi$ , yang menggambarkan penyimpangan data terhadap persamaan distribusi kecepatan logaritmik diketahui dipengaruhi oleh adanya sedimen suspensi.

Sampai saat ini, karakteristik aliran tidak seragam dengan sedimen suspensi masih belum banyak diketahui, dan oleh karenanya akan dikaji dalam tulisan ini. Sehubungan dengan itu, penelitian ini dimaksudkan untuk mengkaji seberapa jauh sedimen suspensi mempengaruhi karakteristik aliran tidak seragam.

#### Landasan Teori

Mengingat dasar teori untuk aliran tidak seragam dengan sedimen suspensi masih belum banyak dikemukakan di literatur, maka sebagai landasan teori tentang aliran tidak seragam

didasarkan pada teori aliran air jernih, sedangkan aliran bersedimen suspensi didasarkan pada teori aliran seragam sedimen suspensi.

### 1. Aliran air jernih

#### *Aliran seragam (uniform flow)*

Pada saluran terbuka, distribusi kecepatan pada aliran sering dibedakan pada daerah *inner region* dan daerah *outer region*. Daerah *inner region* adalah daerah dekat dinding dasar dimana distribusi kecepatan logaritmik masih berlaku, sedangkan daerah *outer region*, adalah daerah yang jauh dari dasar dimana profil kecepatan menyimpang secara jelas dan sistematis dari hukum distribusi kecepatan logaritmik.

Distribusi kecepatan di daerah *inner region*, yang dibatasi oleh  $y/\delta < 0.2$  dapat dirumuskan dengan persamaan (Kironoto, 1993):

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{y}{k_s} \right) + Br \quad (1)$$

dimana  $u$  adalah kecepatan rata-rata titik pada jarak  $y$  dari titik referensi;  $u_*$ , kecepatan geser;  $\kappa$ , konstanta *universal* Von-Karman ( $\kappa = 0.4$ );  $Br$ , konstanta integrasi dari persamaan distribusi kecepatan logaritmik, dan  $k_s$  adalah kekasaran dasar *equivalen* dari Nikuradse.

Nezu dan Rodi (1986) menunjukkan bahwa hukum *wake* (persamaan Coles) dapat digunakan untuk memprediksi distribusi kecepatan di daerah *outer region*. Persamaan Coles dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{U_\infty - u}{u_*} = -\frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{y}{\delta} \right) + \frac{2\Pi}{\kappa} \cos^2 \left( \frac{\pi y}{2\delta} \right) \quad (2)$$

dengan  $U_\infty$  adalah kecepatan *uniform*, yang pada aliran saluran terbuka diambil sebagai kecepatan titik maksimum,  $U_c$ , adalah jarak dari titik referensi sampai pada titik dimana  $u = U_c$ , adalah parameter *wake* dari *Coles* yang memasukkan deviasi data terhadap distribusi kecepatan logaritmik.

#### *Aliran tidak seragam (non-uniform flow)*

Kironoto dan Graf (1995) menunjukkan bahwa teori aliran seragam masih dapat digunakan untuk aliran tidak seragam. Aliran tidak seragam dapat dinyatakan dengan parameter gradien tekanan, yang didefinisikan sebagai berikut :

$$\beta_n = \frac{D}{\tau_0} \frac{\partial p^*}{\partial x} = \frac{D}{\tau_0} \left[ \gamma \left( -S_0 + \frac{\partial D}{\partial x} \right) \right] \quad (3)$$

dengan  $\beta_n$  adalah parameter gradien tekanan;  $\partial p^*/\partial x$  = gradien tekanan,  $D$ , kedalaman aliran;  $S_0$ ,

kemiringan dasar;  $\tau_0$ , tegangan geser dasar, dan  $\gamma$  berat jenis zat cair.

### 2. Aliran dengan Sedimen Suspensi (dan Seragam)

Persamaan Rouse (1937, dalam Yang, 1996) yang dikembangkan untuk aliran seragam, didasarkan pada distribusi kecepatan logaritmik dan asumsi bahwa koefisien difusi sedimen mempunyai nilai yang sama dengan koefisien transfer momentum, dan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{C}{C_a} = \left[ \frac{D-y}{y} \frac{a}{D-a} \right]^z \quad \text{dengan} \quad z = \frac{w_s}{\kappa u_*} \quad (4)$$

dimana  $C$  adalah konsentrasi sedimen suspensi pada suatu titik berjarak  $y$  dari titik referensi;  $C_a$ , konsentrasi referensi yang berjarak  $a$  dari titik referensi;  $D$ , kedalaman aliran, dan  $z$  adalah parameter Rouse.

Tanaka dan Sugimoto (1958, dalam Garde dan Raju, 1977) mengusulkan suatu persamaan sejenis untuk distribusi sedimen suspensi, yang dapat diekspresikan sebagai berikut :

$$\frac{C}{C_a} = \left\{ \left( \frac{\sqrt{D} + \sqrt{D-y}}{\sqrt{D} - \sqrt{D-y}} \right) \left( \frac{\sqrt{D} - \sqrt{D-a}}{\sqrt{D} + \sqrt{D-a}} \right) \right\}^{\frac{w_s}{u_* \kappa}} \quad (5)$$

dengan  $C$  adalah konsentrasi sedimen suspensi pada suatu titik berjarak  $y$  dari titik referensi;  $C_a$ , konsentrasi referensi yang berjarak  $a$  dari titik referensi;  $D$ , kedalaman aliran;  $w_s$ , kecepatan endap partikel suspensi;  $u_*$ , kecepatan gesek, dan  $\kappa$  konstanta Von-Karman.

### 3. Kecepatan Endap Partikel Sedimen Suspensi

Kecepatan endap sedimen suspensi dapat dihitung dengan persamaan (Yang, 1996) :

$$w_s = \frac{1}{18} \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g \frac{d_s^2}{\nu} \quad (4)$$

dimana  $d_s$  = diameter partikel suspensi representatif (cm) ;  $w_s$  = kecepatan endap partikel sedimen suspensi (cm/dt),  $\gamma_s$  dan  $\gamma$  = berat jenis sedimen dan air ( $\text{kg/m}^3$ ).

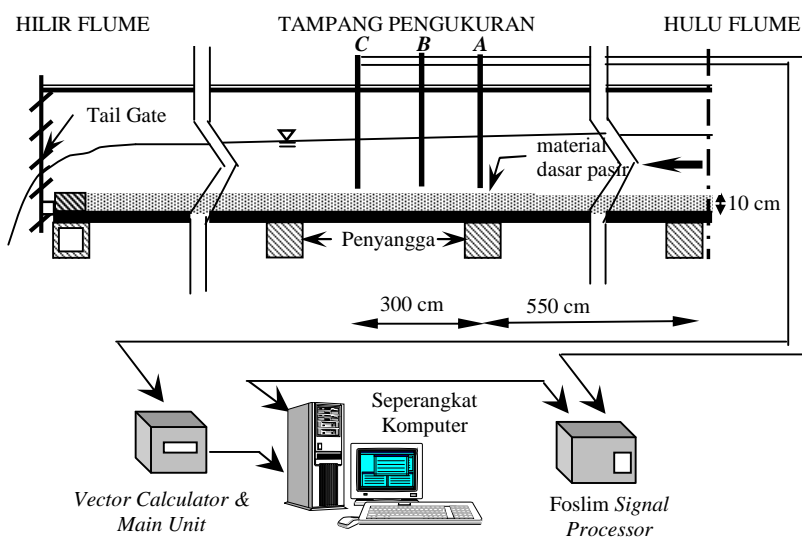
## METODE PENELITIAN

Untuk mengetahui distribusi konsentrasi sedimen suspensi dan distribusi kecepatan aliran pada saluran, dalam penelitian ini dilakukan pengukuran langsung di laboratorium. Pengukuran variabel lainnya seperti kekasaran dasar ( $k_s$ ), dilakukan dengan memperhatikan material dasar

yang digunakan, sebagai mana yang dikemukakan dalam konsep kekasaran permukaan *equivalent sand roughness* dari Nikuradse, yang menghubungkan nilai  $k_s$  dengan ukuran partikel. Untuk material dasar digunakan pasir sungai Progo dengan  $d_{50} = 0.060$  cm. Secara garis besar lokasi pengukuran dan skema pemasangan alat pengukuran seperti pada Gambar 1.

Pengukuran dilakukan langsung pada *Sediment Recirculating Flume*. Pengukuran dilakukan pada posisi tertentu, pada lokasi as dari *flume* (*center line*), dengan harapan data pengukuran sesedikit mungkin

terpengaruh oleh dinding samping *flume*. Variabel utama aliran yang diukur dalam penelitian ini adalah distribusi konsentrasi sedimen suspensi dan distribusi kecepatan aliran (rata-rata titik). Peralatan yang digunakan untuk mengukur konsentrasi sedimen suspensi adalah pengukur optik tipe *Foslim-probe*. Pengukuran distribusi kecepatan titik (rata-rata) arah vertikal pada aliran air dilakukan dengan menggunakan *Electromagnetic flowmeter probe set type VM-201H* kemudian dihubungkan ke *Vector-calculate equipment type DV-101*



Gambar 1. Skema lokasi tampang pengukuran dan instalasi pemasangan perangkat komputer serta alat ukur

## HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

### Deskripsi Perolehan Data

Jumlah *running* data yang diperoleh dalam penelitian ini adalah sejumlah 50 *running* data, yang terdiri dari 18 *running* untuk aliran seragam, 18 *running* untuk aliran diperlambat, dan 14 *running* untuk aliran dipercepat. Pengukuran aliran seragam dilakukan sebagai dasar untuk mempelajari aliran tidak seragam. Pengkodean *running* didasarkan pada perbedaan parameter yang digunakan. Untuk jenis aliran seragam (*Uniform flow*) diberi kode awal huruf *U*, sedangkan untuk aliran tidak seragam diperlambat (*Decelerating flow*) diberi kode huruf *D*. Untuk jenis aliran tidak seragam dipercepat (*Accelerating flow*) diberi kode huruf awal *A*. Kode huruf berikutnya adalah huruf *P*, untuk

menggambarkan jenis material dasar yang digunakan, yaitu pasir dari sungai Progo. Khusus untuk aliran tidak seragam, pengukuran dilakukan pada tiga lokasi yang berbeda, yang berjarak 550 cm, 700 cm dan 850 cm dari *flume entrance*, dan masing-masing diberi kode huruf *A*, *B* dan *C*. Kode huruf terakhir, digunakan untuk menggambarkan urutan *running*. Sebagai contoh, kode *running APAI* menggambarkan aliran dipercepat dengan dasar pasir Progo, pengukuran dilakukan pada posisi titik *A* dan nomor urutan *running 1*.

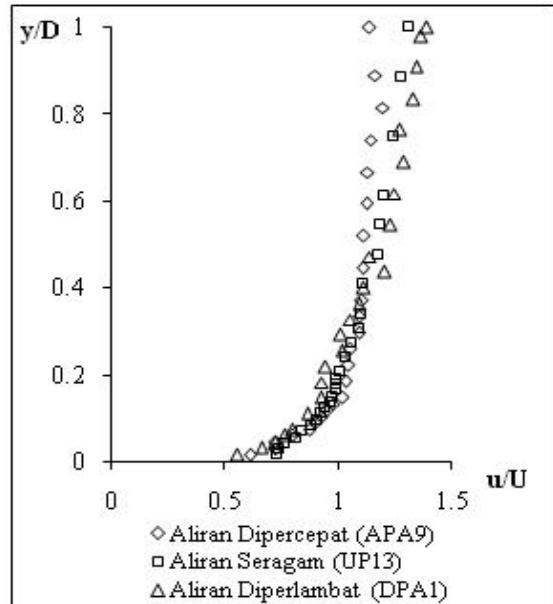
Parameter utama aliran dan beberapa parameter hitungan, seperti  $Br$ ,  $\Pi$ ,  $\beta_n$ , dll, diberikan pada Tabel 1, 2, dan 3, yang berturut-turut untuk aliran seragam, aliran diperlambat, dan aliran dipercepat.

Tabel 1. Variabel pengukuran dan hitungan aliran seragam dengan sedimen suspensi

Run	$x$ (cm)	$S_o$ (-)	$D$ (cm)	$\delta$ (cm)	$b/D$ (-)	$t$ °C	$U$ (cm/s)	$U_c$ (cm/s)	$u_*$ (cm/s)	$v$ (cm <sup>2</sup> /s)	$Re 10^5$ (-)	$Fr$ (-)	$Br$ (-)	$\bar{C}$ gr/lit	$\Pi$ (-)	$\beta_n$ (-)
UP1	700	0.0003	9.9	9.9	6.06	28	24.19	31.60	1.87	0.0084	0.29	0.25	4.60	4.89	-0.13	-1
UP2	700	0.0005	9.9	9.9	6.06	29	23.34	29.64	1.56	0.0082	0.28	0.24	6.46	4.80	-0.04	-1
UP3	700	0.0008	9.8	9.8	6.06	28	22.94	29.40	1.44	0.0084	0.27	0.23	7.36	5.33	0.08	-1
UP4	700	0.0003	9.9	9.9	6.06	28	25.48	32.11	1.53	0.0084	0.30	0.26	8.21	4.23	0.00	-1
UP5	700	0.0005	10.2	10.2	5.88	28	23.97	30.50	1.38	0.0084	0.29	0.24	8.75	4.91	0.10	-1
UP6	700	0.0008	9.9	9.9	6.06	29	24.65	32.00	1.33	0.0082	0.30	0.25	9.88	4.63	0.39	-1
UP7	700	0.0003	9.9	9.9	6.06	29	28.73	37.04	1.65	0.0082	0.35	0.29	8.77	4.07	0.21	-1
UP8	700	0.0005	9.9	9.9	6.06	30	26.74	36.96	1.67	0.0081	0.33	0.27	7.75	4.17	0.07	-1
UP9	700	0.0008	10	9.0	6.00	30	28.34	36.03	1.60	0.0081	0.35	0.29	10.09	4.33	0.08	-1
UP10	700	0.0008	16.5	15.0	3.64	29	27.09	34.69	1.50	0.0082	0.54	0.21	8.72	5.84	0.10	-1
UP11	700	0.0008	16.2	16.2	3.70	29	33.81	45.54	1.90	0.0082	0.67	0.27	8.33	5.04	0.36	-1
UP12	700	0.0008	10	10.0	6.00	30	34.07	45.47	2.13	0.0081	0.42	0.34	7.90	4.60	0.16	-1
UP13	700	0.0008	14.7	14.7	4.08	28	24.56	32.99	1.46	0.0084	0.43	0.21	7.39	4.22	0.31	-1
UP14	700	0.0008	16.4	13.0	3.66	29	18.76	22.38	1.12	0.0082	0.37	0.15	7.87	5.79	-0.40	-1
UP15	700	0.0012	12.4	12.4	4.84	28	31.29	36.06	1.74	0.0084	0.46	0.28	10.28	4.45	-0.39	-1
UP16	700	0.0012	12.1	12.1	4.96	28	30.63	39.93	1.73	0.0084	0.44	0.28	8.47	5.09	0.39	-1
UP17	700	0.0012	12.2	12.2	4.92	28	36.15	42.64	2.01	0.0084	0.53	0.33	9.60	5.33	-0.33	-1
UP18	700	0.0012	11.3	11.3	5.31	28	30.63	40.12	1.87	0.0084	0.41	0.29	7.20	4.56	0.36	-1

**Distribusi Kecepatan**

Pada Gambar 2 diperlihatkan contoh tipikal distribusi kecepatan pada aliran dengan sedimen suspensi, untuk aliran seragam, aliran dipercepat, dan aliran diperlambat. *Trend* distribusi kecepatan untuk ketiga jenis aliran relatif sama untuk data di daerah *inner region*, namun untuk data di daerah *outer region*, terdapat perbedaan bentuk yang cukup signifikan. Di daerah *outer region*, bentuk distribusi kecepatan untuk aliran dipercepat relatif lebih seragam dibandingkan dengan distribusi kecepatan untuk aliran seragam maupun untuk aliran diperlambat. Dibandingkan dengan data pada aliran seragam, di daerah *outer region*, bentuk distribusi kecepatan pada aliran diperlambat relatif lebih membuka, dan sebaliknya, relatif lebih menutup pada aliran dipercepat.



Gambar 2. Perbandingan distribusi kecepatan pada aliran dengan sedimen suspensi, untuk aliran seragam, dipercepat, dan aliran diperlambat

Tabel 2. Variabel pengukuran dan hitungan aliran diperlambat dengan sedimen suspensi

Run	$x$ (cm)	$S_o$ (-)	$D$ (cm)	$\delta$ (cm)	$b/D$ (-)	$t$ °C	$U$ (cm/s)	$U_c$ (cm/s)	$u_*$ (cm/s)	$v$ (cm <sup>2</sup> /s)	$Re 10^5$ (-)	$Fr$ (-)	$Br$ (-)	$\bar{C}$ gr/lit	$\Pi$ (-)	$\beta_n$ (-)
DPA1	550	0.0125	13.8	11.5	4.3	29	22.469	29.921	1.14	0.00822	0.38	0.193	6.1	4.6	0.624	2.995
DPB1	700	0.0125	15.7	15.6	3.85	29	19.845	26.703	1.32	0.00822	0.38	0.16	5.34	2.85	0.274	2.298
DPC1	850	0.0125	17.6	15.5	3.43	29	18.037	23.724	0.92	0.00822	0.39	0.137	9.09	2.64	0.655	5.011
DPA2	550	0.0125	15.9	13.5	3.8	29	19.024	24.369	1.40	0.00822	0.37	0.153	3.64	2.51	0.036	4.818
DPB2	700	0.0125	17.8	14.5	3.37	29	17.626	22.682	0.93	0.00822	0.38	0.133	8.22	1.89	0.526	12.144
DPC2	850	0.0125	19.8	19.8	3.04	29	16.112	22.275	0.99	0.00822	0.39	0.116	5.34	1.3	0.562	11.972
DPA3	550	0.0125	15.8	15.8	3.8	29	21.979	28.562	1.24	0.00822	0.42	0.176	7.34	2.94	0.347	6.008
DPB3	700	0.0125	17.8	14.5	3.37	29	20.567	25.958	1.11	0.00822	0.45	0.156	8.47	1.93	0.258	8.611
DPC3	850	0.0125	19.8	16.5	3.03	29	18.963	24.228	0.95	0.00822	0.46	0.136	9.44	1.43	0.421	12.899
DPA4	550	0.0125	16.0	13.5	3.75	30	25.646	31.293	1.79	0.00805	0.51	0.205	4.01	3.41	-0.058	3.696
DPB4	700	0.0125	18.0	15.5	3.3	30	22.199	28.966	1.64	0.00805	0.50	0.167	3.54	5.2	0.084	5.055
DPC4	850	0.0125	20.0	16.5	3	30	20.843	26.701	1.10	0.00805	0.52	0.149	8.45	4.2	0.25	12.621
DPA5	550	0.0125	16.1	11.5	3.7	29	18.806	24.046	1.46	0.00822	0.37	0.15	3.07	2.68	0.035	0.63
DPB5	700	0.0125	18.0	14.5	3.3	29	17.427	22.462	1.20	0.00822	0.38	0.131	5.72	2.83	0.26	1.261
DPC5	850	0.0125	19.8	14.5	3	29	15.566	20.215	1.04	0.00822	0.38	0.112	3.85	1.2	0.14	0.783
DPA6	550	0.0125	16.6	16.7	3.59	29	20.217	25.773	1.30	0.00822	0.41	0.158	5.12	3.23	0.21	5.241
DPB6	700	0.0125	18.5	15.5	3.26	29	18.698	24.382	1.18	0.00822	0.42	0.139	5.61	2.71	0.268	6.111
DPC6	850	0.0125	20.5	16.5	2.9	29	17.087	22.297	0.94	0.00822	0.43	0.12	7.48	2.26	0.486	12.179
DPA7	550	0.0125	15.8	13.5	3.8	30	17.761	22.834	1.29	0.00805	0.35	0.143	4.02	2.16	0.032	3.421
DPB7	700	0.0125	17.7	14.5	3.39	30	16.525	21.483	1.08	0.00805	0.36	0.125	5.19	1.99	0.206	5.487
DPC7	850	0.0125	19.7	16.5	3.06	30	15.107	20.007	0.86	0.00805	0.37	0.109	5.87	1.76	0.78	11.692
DPA8	550	0.01	17.7	15.5	3.37	29	25.863	29.923	1.35	0.00822	0.56	0.196	9.71	4.15	-0.295	1.914
DPB8	700	0.01	19.2	15.5	3.16	29	24.351	28.246	1.37	0.00822	0.57	0.177	8.37	3.62	-0.411	1.596
DPC8	850	0.01	20.8	14.5	2.87	29	22.782	26.948	1.07	0.00822	0.58	0.16	10.96	3.78	0.18	3.592
DPA9	550	0.01	16.4	12.5	3.66	29	17.727	21.202	1.10	0.00822	0.35	0.14	6.81	1.71	-0.218	0.268
DPB9	700	0.01	17.9	12.5	3.35	29	16.431	19.988	1.10	0.00822	0.36	0.124	5.13	1.08	-0.08	0.23
DPC9	850	0.01	19.4	15.5	3.09	29	15.144	18.83	1.02	0.00822	0.36	0.11	4.5	1.08	0.04	0.241
DPA10	550	0.01	10.3	8.5	5.7	29	22.731	29.298	1.54	0.00822	0.29	0.226	5.73	0.82	0.136	2.115
DPB10	700	0.01	11.9	9.5	5	29	21.574	27.181	1.33	0.00822	0.31	0.2	6.7	1.16	0.2	3.13
DPC10	850	0.01	13.5	10.5	4.44	29	19.171	25.09	1.39	0.00822	0.31	0.167	4.38	1.16	0.03	3.484
DPA11	550	0.01	11.4	11.4	5.24	29	28.65	33.436	1.42	0.00822	0.40	0.272	9.95	1.16	0.13	3.343
DPB11	700	0.01	12.6	12.9	4.65	29	23.934	30.554	1.79	0.00822	0.37	0.215	3.79	1.26	0.098	0.674
DPC11	850	0.01	14.5	14	4.29	29	22.261	29.247	1.88	0.00822	0.39	0.187	2.43	1.22	-0.044	2.282
DPA12	550	0.01	12.5	8.5	4.8	29	23.986	29.478	1.30	0.00822	0.36	0.217	8.68	2.32	0.306	4.969
DPB12	700	0.01	14.1	10.5	4.2	29	21.03	26.689	1.18	0.00822	0.36	0.179	8.17	2.48	0.211	6.798
DPC12	850	0.01	15.7	13.5	3.8	29	18.72	24.334	1.09	0.00822	0.36	0.151	7	2.73	0.364	8.863
DPA13	550	0.01	16.9	14.5	3.55	29	20.687	24.641	1.05	0.00822	0.43	0.161	8.92	5.32	0.122	5.175
DPB13	700	0.01	18.4	15.5	3.26	29	19.333	23.672	1.03	0.00822	0.43	0.144	8.8	5.14	0.184	4.591
DPC13	850	0.01	20.0	16.5	3	29	17.526	22.013	0.90	0.00822	0.43	0.125	8.83	5.05	0.298	7.333
DPA14	550	0.01	16.0	12.5	3.75	30	18.446	22.313	0.97	0.00805	0.37	0.147	9.15	7.75	0.05	8.254
DPB14	700	0.01	17.5	13.5	3.4	30	17.417	20.105	0.86	0.00805	0.38	0.133	10.17	7.33	-0.146	8.986
DPC14	850	0.01	19.1	14.5	3.16	30	15.575	19.047	1.02	0.00805	0.37	0.114	6.05	7.1	-0.094	7.799
DPA15	550	0.0063	12.8	12.7	4.72	29	27.268	32.544	1.54	0.00822	0.42	0.243	9.15	6.39	-0.28	0.68
DPB15	700	0.0063	13.7	13.7	4.39	29	25.05	30.425	1.35	0.00822	0.42	0.216	9.15	6.36	-0.014	0.347
DPC15	850	0.0063	14.7	11.5	4.1	29	22.954	28.738	1.54	0.00822	0.41	0.191	5.18	5.11	0.068	0.688
DPA16	550	0.0063	11.9	7.5	5	29	25.05	29.671	1.33	0.00822	0.36	0.232	9.81	4.25	0.08	1.047
DPB16	700	0.0063	12.9	11.5	4.7	29	23.499	28.497	1.41	0.00822	0.37	0.209	7.33	4.02	-0.104	0.902
DPC16	850	0.0063	13.8	10.5	4.4	29	21.128	27.267	1.52	0.00822	0.35	0.182	4.19	4.47	0.225	0.429
DPA17	550	0.0063	12.9	9.5	4.65	29	24.289	28.251	1.23	0.00822	0.38	0.216	11.26	5.72	-0.132	3.4
DPB17	700	0.0063	13.9	11.5	4.3	29	23.215	27.799	1.17	0.00822	0.39	0.199	11.04	4.66	-0.06	4.078
DPC17	850	0.0063	14.9	11.5	4.03	29	21.138	26.839	1.17	0.00822	0.38	0.175	8.83	4.09	0.384	4.358
DPA18	550	0.0063	15.6	12.5	3.85	30	21.365	25.142	1.10	0.00805	0.41	0.173	9.76	9.45	-0.107	6.198
DPB18	700	0.0063	16.7	12.5	3.6	30	20.339	24.011	1.16	0.00805	0.42	0.159	8.27	7.71	-0.17	6.688
DPC18	850	0.0063	17.7	13.5	3.4	30	19.322	23.208	0.99	0.00805	0.42	0.147	9.83	7.43	0	9.627

Tabel 3. Variabel pengukuran dan hitungan aliran dipercepat dengan sedimen suspensi

Run	$x$ (cm)	$S_o$ (-)	$D$ (cm)	$\delta$ (cm)	$b/D$ (-)	$t$ °C	$U$ (cm/s)	$U_c$ (cm/s)	$u_*$ (cm/s)	$\nu$ (cm <sup>2</sup> /s)	$Re 10^5$ (-)	$Fr$ (-)	$Br$ (-)	$\bar{C}$ gr/lt	$\Pi$ (-)	$\beta_n$ (-)
APA1	550	-0.0005	9.3	7.0	6.45	30	31.70	40.00	1.91	0.00805	1.46	0.33	7.71	2.59	0.07	-5.70
APB1	700	-0.0005	9.0	9.0	6.68	30	30.92	41.01	1.79	0.00805	1.38	0.33	9.09	2.89	0.18	-5.71
APC1	850	-0.0005	8.8	8.8	6.85	30	31.26	42.92	1.89	0.00805	1.36	0.34	8.44	2.71	0.32	-4.64
APA2	550	-0.0005	9.4	9.4	6.38	30	32.98	42.22	2.04	0.00805	1.54	0.34	8.37	3.32	-0.06	-3.24
APB2	700	-0.0005	9.0	9.0	6.67	30	33.45	42.40	2.08	0.00805	1.50	0.36	7.91	2.88	-0.16	-3.00
APC2	850	-0.0005	8.8	8.8	6.82	30	34.71	42.94	2.34	0.00805	1.52	0.37	6.71	3.43	0.04	-2.34
APA3	550	-0.0005	9.7	9.7	6.19	30	29.21	36.81	1.74	0.00805	1.41	0.30	9.03	2.41	-0.12	-2.68
APB3	700	-0.0005	9.6	9.6	6.25	30	29.94	36.77	1.94	0.00805	1.43	0.31	7.99	1.99	-0.35	-2.11
APC3	850	-0.0005	9.5	9.5	6.32	30	30.50	43.00	2.04	0.00805	1.44	0.32	7.25	2.15	-0.14	-1.89
APA4	550	-0.0005	10.0	10.0	6.00	30	33.17	43.29	2.38	0.00805	1.65	0.34	5.85	2.41	-0.07	-1.47
APB4	700	-0.0005	9.8	9.8	6.12	30	34.39	44.82	2.64	0.00805	1.67	0.35	5.09	2.37	-0.16	-1.17
APC4	850	-0.0005	9.6	9.6	6.25	30	34.16	44.30	2.64	0.00805	1.63	0.35	5.10	2.44	-0.12	-1.13
APA5	550	-0.0005	10.8	10.8	5.56	30	34.01	43.26	2.31	0.00805	1.82	0.33	6.42	2.11	-0.14	-1.64
APB5	700	-0.0005	10.6	9.0	5.66	30	34.36	42.60	2.43	0.00805	1.81	0.34	6.01	2.08	-0.19	-1.47
APC5	850	-0.0005	10.4	10.4	5.77	30	34.48	43.56	2.70	0.00805	1.78	0.34	5.03	2.39	-0.36	-1.16
APA6	550	-0.0005	12.5	12.5	4.80	30	32.27	39.87	1.99	0.00805	2.00	0.29	8.11	1.89	-0.19	-4.63
APB6	700	-0.0005	12.2	12.2	4.92	30	32.93	42.96	2.05	0.00805	2.00	0.30	7.19	1.99	0.05	-4.28
APC6	850	-0.0005	11.9	11.9	5.04	30	33.23	42.48	2.21	0.00805	1.96	0.31	6.53	1.59	-0.10	-3.60
APA7	550	-0.001	10.0	10.0	6.00	30	29.88	34.97	2.01	0.00805	1.48	0.30	6.17	2.47	-0.32	-5.65
APB7	700	-0.001	9.5	9.5	6.32	30	30.85	36.01	1.77	0.00805	1.46	0.32	8.80	2.52	-0.22	-6.96
APC7	850	-0.001	9.0	7.0	6.67	30	30.80	36.32	1.98	0.00805	1.38	0.33	6.98	2.41	-0.19	-5.24
APA8	550	-0.001	11.8	10.0	5.08	30	33.39	39.96	2.25	0.00805	1.96	0.31	6.12	2.55	-0.23	-0.75
APB8	700	-0.001	11.6	11.6	5.17	30	32.06	40.41	2.07	0.00805	1.85	0.30	6.86	2.38	-0.10	-0.68
APC8	850	-0.001	11.5	11.5	5.22	30	33.11	41.83	2.28	0.00805	1.89	0.31	6.10	2.23	-0.17	-0.46
APA9	550	-0.001	13.5	11.0	4.44	30	30.95	36.95	1.91	0.00805	2.08	0.27	7.24	2.47	-0.19	-9.02
APB9	700	-0.001	13.0	10.0	4.62	30	30.92	37.07	2.08	0.00805	2.00	0.27	5.92	2.29	-0.18	-7.23
APC9	850	-0.001	12.5	10.0	4.80	30	31.55	39.06	2.07	0.00805	1.96	0.29	6.33	2.50	-0.05	-6.97
APA10	550	-0.002	9.8	9.8	6.12	30	38.82	46.89	2.35	0.00805	1.89	0.40	7.38	3.02	-0.03	-6.43
APB10	700	-0.002	8.9	8.9	6.74	30	39.51	47.83	2.68	0.00805	1.75	0.42	5.95	3.19	-0.24	-3.69
APC10	850	-0.002	9.0	9.0	6.67	30	38.54	47.36	2.29	0.00805	1.72	0.41	6.60	3.05	-0.09	-4.41
APA11	550	-0.002	9.4	9.4	6.38	30	30.15	36.18	1.81	0.00805	1.41	0.31	7.58	3.41	-0.06	-13.12
APB11	700	-0.002	8.4	8.4	7.14	30	31.99	36.85	2.15	0.00805	1.34	0.35	6.29	2.82	-0.30	-8.32
APC11	850	-0.002	7.4	7.4	8.11	30	32.98	40.71	2.02	0.00805	1.21	0.39	7.46	2.78	0.03	-8.33
APA12	550	-0.002	10.1	9.0	5.94	30	39.15	45.55	2.85	0.00805	1.96	0.39	5.23	4.25	-0.42	-0.44
APB12	700	-0.002	9.7	9.7	6.19	30	39.06	47.71	2.68	0.00805	1.88	0.40	5.09	4.40	0.00	-0.47
APC12	850	-0.002	9.4	9.4	6.38	30	40.32	49.97	3.20	0.00805	1.88	0.42	4.15	4.51	-0.30	-0.32
APA13	550	-0.002	10.2	10.2	5.88	30	34.69	44.51	2.63	0.00805	1.76	0.35	4.43	2.90	-0.07	-3.77
APB13	700	-0.002	9.4	9.4	6.38	30	35.55	44.32	2.39	0.00805	1.66	0.37	6.09	1.53	-0.06	-4.23
APC13	850	-0.002	8.8	8.8	6.82	30	35.37	44.71	2.49	0.00805	1.55	0.38	5.64	1.30	-0.07	-3.65
APA14	550	-0.002	10.6	10.6	5.66	30	33.03	38.76	2.22	0.00805	1.74	0.32	6.43	1.94	-0.29	-3.97
APB14	700	-0.002	9.8	9.0	6.12	30	35.77	44.58	2.66	0.00805	1.74	0.37	4.89	2.47	-0.13	-2.97
APC14	850	-0.002	9.4	9.0	6.38	30	38.02	46.54	2.76	0.00805	1.78	0.40	5.05	2.49	-0.16	-2.33

$x$  – jarak titik pengukuran dari *flume entrance*;  $S_o$  – kemiringan dasar saluran;  $D$  – kedalaman aliran;  $\delta$  – jarak dari titik referensi sampai pada titik dimana  $u = U_c$ ;  $b/D$  – *aspect ratio*;  $b$  – lebar flume (60 cm);  $t$  – suhu air;  $U$  – kecepatan rata-rata vertikal profil aliran;  $U_c$  – kecepatan maksimum distribusi kecepatan;  $u_*$  – kecepatan gesek;  $\nu$  – viskositas kinematik;  $Re = 4UD/\nu$  – angka Reynolds;  $Fr = U/(gD)$  – angka Froude;  $Br$  – konstanta integrasi dari *log-law*;  $\bar{C}$  – konsentrasi sedimen suspensi rata-rata pengukuran;  $\Pi$  – parameter *Coles*;  $\beta_n$  – parameter gradien tekanan.

#### Konstanta integrasi *log-law*, $Br$

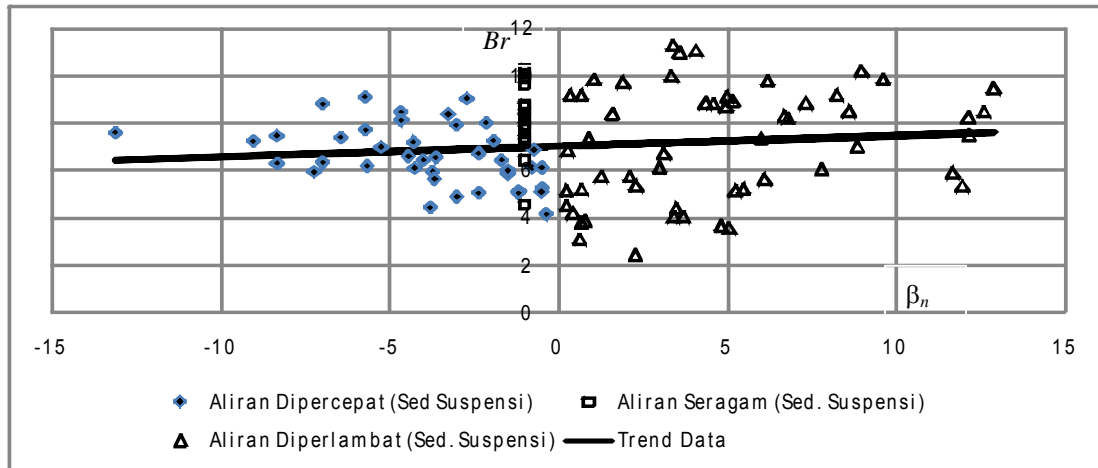
Dengan berdasarkan persamaan distribusi kecepatan logaritmik (Persamaan 1) dan data pengukuran distribusi kecepatan di daerah *inner region*, dapat diperoleh nilai konstanta integrasi,  $Br$  (dan kecepatan gesek,  $u_*$ ). Metode ini sering dikenal sebagai metode Clauser. Dengan demikian, selain dapat diperoleh nilai kecepatan gesek,  $u_*$ , metode

Clauser juga dapat memberikan nilai konstanta integrasi numerik dari persamaan distribusi kecepatan,  $Br$ .

Dengan menggunakan metoda Clauser diperoleh nilai konstanta integrasi,  $Br$  (dan kecepatan gesek,  $u_*$ ), sebagaimana diberikan pada Tabel 1, 2 dan 3 di depan, yang berturut-turut untuk aliran seragam, aliran dipercepat dan aliran diperlambat. Pada Gambar 3 diplotkan data nilai  $Br$  terhadap nilai gradien tekanan,  $\beta_n$ , dimana terlihat bahwa

penyebaran data nilai  $Br$  cukup signifikan, yang disebabkan oleh lebih sulitnya melakukan pengukuran kecepatan pada aliran tidak seragam. Dari plot data  $Br$  pada gambar, tampak ada sedikit *trend* bahwa nilai  $Br$  meningkat dengan peningkatan

$\beta_n$ . Dibandingkan dengan aliran air jernih dimana nilai  $Br = 8.5 \pm 10 \%$ , untuk aliran dengan sedimen suspensi, nilai  $Br$  relatif lebih kecil, seperti diperlihatkan pada Gambar 3 di bawah.

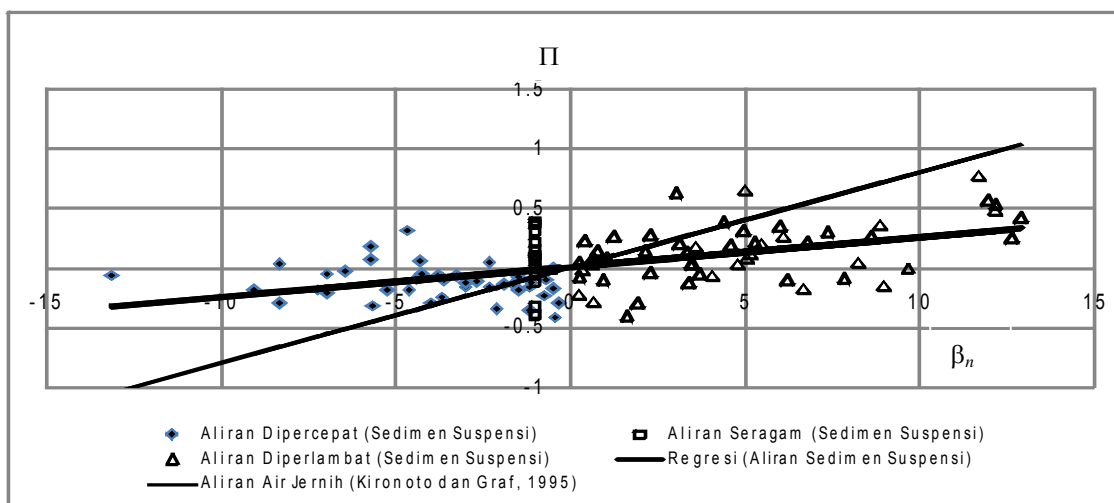


Gambar 3. Plot konstanta integrasi,  $Br$ , dengan parameter gradien tekanan  $\beta_n$ .

*Parameter Coles,  $\Pi$*

Untuk daerah *outer region*, data pengukuran distribusi kecepatan mengikuti persamaan Coles (Persamaan 2), dengan  $U_c$  diambil sebagai kecepatan titik maksimum, yang diperoleh dari data distribusi kecepatan, dan adalah jarak antara titik referensi sampai dengan titik dimana  $u = U_c$ ; adalah parameter *wake* dari Coles yang memasukkan deviasi data pengukuran pada  $y/\delta = 1$  terhadap distribusi kecepatan logaritmik, yang nilainya sama dengan  $2\Pi/\kappa$ .

Nilai parameter  $\Pi$ , yang menggambarkan penyimpangan data pengukuran dengan persamaan distribusi kecepatan logaritmik, digambarkan sebagai fungsi parameter gradien tekanan,  $\Pi = f(\beta_n)$ , sebagaimana dilakukan oleh Kironoto dan Graf (1995) untuk aliran air jernih. Pada Gambar 4 ditunjukkan plot data nilai  $\Pi$  dengan parameter gradien tekanan,  $\beta_n$ . Plot data juga dibandingkan dengan data  $\Pi = f(\beta_n)$  untuk aliran air jernih (Kironoto dan Graf, 1995)

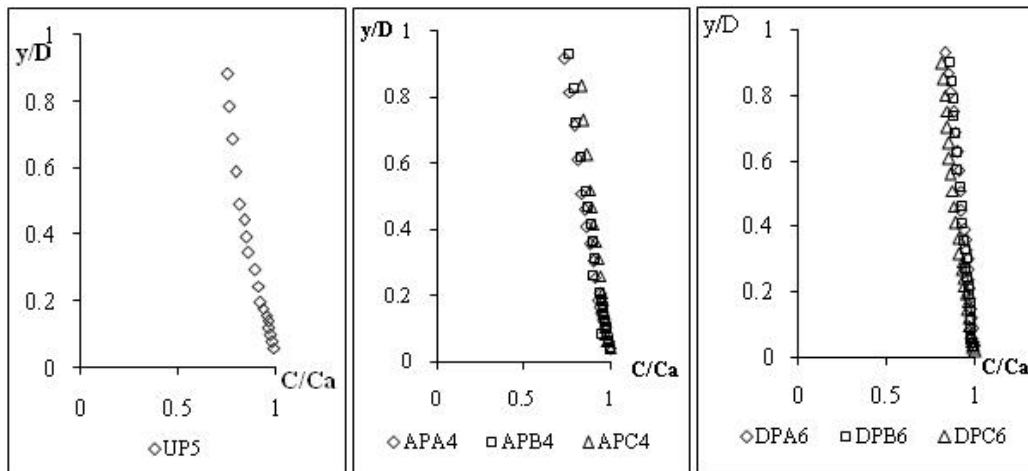


Gambar 4. Hubungan parameter Coles,  $\Pi$ , dengan parameter gradien tekanan  $\beta_n$ .

Meskipun mempunyai bentuk fungsi yang berbeda antara aliran air jernih dengan aliran sedimen suspensi, namun *trend* data untuk  $\Pi = f(\beta_n)$  relatif sama, yaitu  $\Pi$  cenderung membesar dengan peningkatan parameter gradien tekanan  $\beta_n$ . Pada aliran dipercepat dengan sedimen suspensi,  $\Pi$ , mempunyai *trend* nilai yang lebih kecil dibandingkan pada aliran air jernih, dan sebaliknya untuk aliran diperlambat.

### Distribusi Konsentrasi Sedimen Suspensi

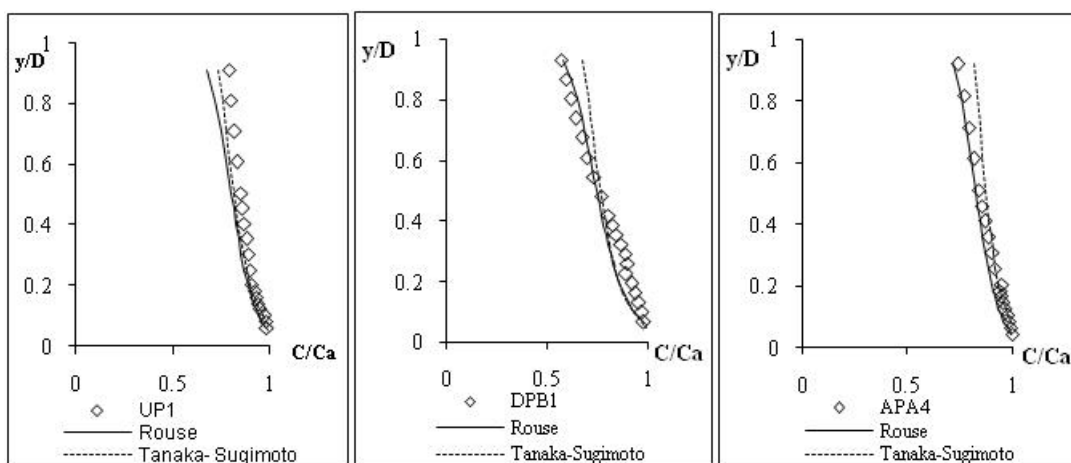
Pada Gambar 5, ditunjukkan distribusi konsentrasi sedimen suspensi untuk data aliran seragam, aliran dipercepat dan aliran diperlambat. Data dinyatakan dalam bentuk  $C/C_a$ , dimana  $C_a$  adalah nilai konsentrasi sedimen suspensi referensi. Tampak bahwa *trend* kurve untuk ke tiga tipe aliran relatif sama, dimana ke arah muka air, nilai konsentrasi sedimen suspensi semakin mengecil.



Gambar 5. Contoh tipikal distribusi konsentrasi sedimen suspensi aliran seragam, aliran dipercepat dan aliran diperlambat

Pada Gambar 6 diperlihatkan perbandingan antara data pengukuran distribusi konsentrasi sedimen suspensi dengan persamaan distribusi konsentrasi sedimen suspensi yang ada di literatur, yaitu Persamaan Rouse dan Persamaan Tanaka-Sugimoto; kedua persamaan tersebut dikembangkan

untuk aliran seragam. Tampak pada gambar, bahwa meskipun aliran mengalami percepatan dan perlambatan, namun ternyata kedua persamaan tersebut masih dapat memprediksi data pengukuran distribusi konsentrasi sedimen suspensi relatif cukup baik.



Gambar 6. Distribusi konsentrasi sedimen suspensi hasil pengukuran dibandingkan dengan persamaan Rouse dan persamaan Tanaka-Sugimoto, untuk aliran seragam, aliran diperlambat dan aliran dipercepat.



## KESIMPULAN

Dari hasil analisis terhadap data pengukuran yang diperoleh dalam penelitian ini, dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut ini.

1. *Trend* bentuk distribusi kecepatan untuk aliran dengan sedimen suspensi, baik untuk jenis aliran seragam, aliran diperlambat, maupun aliran dipercepat, relatif sama untuk data di daerah *inner region*. Sedangkan di daerah *outer region*, bentuk distribusi kecepatan untuk aliran dipercepat relatif lebih menutup dibandingkan dengan distribusi kecepatan untuk aliran seragam maupun untuk aliran diperlambat (relatif lebih membuka).
2. Dari hasil perhitungan nilai konstanta integrasi logaritmik,  $Br$ , tampak bahwa nilai  $Br$  mempunyai *trend* sedikit meningkat dengan peningkatan  $\beta_n$ . Dibandingkan dengan air jernih, nilai  $Br$  untuk aliran dengan sedimen suspensi relatif lebih kecil.
3. Dibandingkan dengan aliran air jernih, *trend* data untuk  $\Pi = f(\beta_n)$  relatif sama, yaitu  $\Pi$  cenderung membesar dengan peningkatan parameter gradien tekanan  $\beta_n$ . Namun, pada aliran dipercepat dengan sedimen suspensi, nilai  $\Pi$  mempunyai *trend* yang lebih kecil dibandingkan pada aliran air jernih, dan sebaliknya untuk aliran diperlambat.
4. Persamaan Rouse dan persamaan Tanaka-Sugimoto masih dapat memprediksi data pengukuran distribusi konsentrasi sedimen suspensi relatif cukup baik, baik untuk aliran seragam, aliran diperlambat maupun untuk aliran dipercepat.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Ir. Utomo Suryo Atmodjo, MT. dan Ir. Zainuddin Muchtar, MT. atas bantuannya dalam proses pelaksanaan pengukuran di laboratorium, dan Dr. Ir. Bambang Yulistiyanto atas diskusi dan

masukannya sehingga penelitian ini dapat berjalan dengan baik.

## DAFTAR PUSTAKA

- Cardoso, A. H., Graf, W. H. and Gust, G., 1991, Steady Gradually Accelerating Flow in A Smooth Open Channel., *J. Hydr. Res.*, 29(4), 525–543.
- Coleman, N. L., 1981, Velocity Profiles With Suspended Sediment., *J. Hydr. Res.*, 19(3), 211–229.
- Coleman, N. L., 1986, Effects of Suspended on the Open-Channel Velocity Distribution, *J. Water Resources Res.*, Vol. 22, No. 10.
- Dwi Handaya Nugroho, 2002, Sedimen Suspensi pada Aliran Dipercepat Tanpa Angkutan Sedimen Dasar, *Tesis S-2 Teknik Sipil*, UGM, Yogyakarta.
- Garde, R. J., and Ranga Raju, K. G., 1977, *Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Streams Problems*, Wiley Eastern Limited, New Delhi.
- Kironoto, B. A., 1993, Turbulence Characteristics of Uniform and Non-Uniform, Rough Open-Channel Flow, *These No 1094*, EPFL, Lausanne.
- Kironoto, B. A., and Graf, W. H., 1995, Turbulence Characteristics in Rough Non-Uniform Open-Channel Flow, *Proc. Instn Civ. Engrs Wat., Marit. & Energy*, 112, dec., 336-348.
- Lutjito, 2002, Sedimen Suspensi Pada Kondisi Aliran Diperlambat Dalam Saluran Terbuka, *Tesis S-2 Teknik Sipil*, UGM, Yogyakarta
- 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.
- Yang, C T, 1996, *Sediment Transport Theory and Practice*, The McGraw-Hill Companies, Inc., New York.