

THE NONUNIFORMITY ASPECT OF GRANSIZES TO BEDLOAD

ASPEK KETIDAKSERAGAMAN BUTIRAN PADA ANGKUTAN SEDIMEN DASAR

Junaidi¹⁾, Bambang Agus Kironoto²⁾, dan Bambang Yulistiyanto²⁾

¹⁾Alumni Program Pascasarjana Teknik Sipil Universitas Gadjah Mada

²⁾Staf Pengajar Program Pascasarjana Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No. 2 Yogyakarta, Indonesia.

Email: yulis@tsipil.ugm.ac.id

ABSTRACT

Rivers are the best sites to observe the natural effects of sediment transport. To consider the effect of nonuniformity of bed material on sediment transport rates, various representative of bed material sizes have been proposed. In this paper, the effect of nonuniformity on the transport of sediment mixtures is studied using Engelund and Hansen (1967) and Brownlie (1981) formulas. The bed materials used in this study are collected from Krasak river with three samples which have median diameters (d_{50}) 10,2 mm, 0,9 mm, and 0,7 mm respectively. The nonuniformity of sediment was tested using five nonuniformity coefficients defined as $S_{G,T}$, S_i , $S_{F\&W}$, G , and σ in the calculation using equivalent representative diameter (d_e), variable representative diameter (d_{ev}) and a size gradation correction factor (K_d). The accuracy of the results are determined using discrepancy ratio (r), which is a ratio of the calculated values to the measured values. The results are analyzed using a number of percent data as a criteria in the range of 0,25 – 1,75 of r values for each calculations. The results from Engelund and Hansen's formula based on d_e parameter indicated that the best accurate prediction is on G coefficient with 48,28% of data; whereas on K_d factor, G and $S_{G,T}$ coefficient give highest percentage with 51,28% of data respectively. The best performance for d_{ev} parameter is on $S_{F\&W}$ coefficient with 62,07% of data, however σ coefficient gives poor prediction with 48,28% of data. In general, Brownlie's formula gives more accurate prediction compared with the earlier for G nonuniformity coefficient with 82,76% of data.

Key words: nonuniformity, sediment transport, discrepancy ratio

ABSTRAK

Sungai-sungai adalah ruang terbaik untuk penelitian pengaruh alami angkutan sedimen. Dengan memperitmbangkan pengaruh ketidakeragaman bahan dasar pada laju angkutan sedimen, variasi ukuran bahan dasar yang ada telah diusulkan. Dalam tulisan ini, pengaruh ketidakeragaman campuran angkutan sedimen di pelajari menggunakan persamaan Engelund dan Hansen (1976) dan Brownlie (1981). Bahan dasar yang digunakan dalam studi ini adalah diambilkan dari Sungai Krasak dengan 3 sampel yang mempunyai diameter median (d_{50}) dengan urutan 10,2 mm, 09 mm, dan 0,7 mm. Ketidakeragaman sedimen diuji menggunakan 5 koefisien ketidakeragaman, yaitu $S_{G,T}$, S_i , $S_{F\&W}$, G , dan σ dalam hitungan menggunakan diameter ekuivalen (d_e), variabel diameter (d_{ev}) dan faktor koreksi ukuran gradasi (K_d). Ketepatan hasil ditentukan menggunakan rasio perbedaan (r), yang merupakan suatu rasio nilai hitungan terhadap nilai terukur. Hasil dianalisis dengan menggunakan sejumlah persen data sebagai suatu kriteria dalam jangkauan 0,25 – 1,75 dari nilai untuk setiap hitungan-hitungan. Hasil dari persamaan Engelund dan Hansen's berdasarkan pada parameter d_e menunjukkan bahwa prediksi terakurat adalah pada koefisien G dengan 48,28% data, sedangkan faktor K_d , D dan koefisien $S_{G,T}$ memberikan persentase tertinggi dengan 51,28% data. Performan terbaik untuk parameter d_{ev} adalah pada koefisien $S_{F\&W}$ dengan 62,07% data, namun koefisien σ memberikan prediksi yang jelek dengan 48,28% data. Secara umum, persamaan Brownlie's memberikan prediksi lebih akurat dibandingkan prediksi-prediksi terdahulu untuk koefisien ketidakeragaman G dengan 82,76% data.

Kata-kata kunci: ketidakeragaman, angkutan sedimen, rasio perbedaan

PENDAHULUAN

Sungai adalah lokasi yang paling baik untuk mengamati pengaruh alamiah dari angkutan sedimen. Sungai memperlihatkan variasi yang besar dalam morfologinya dari satu lokasi ke lokasi lainnya. Pada beberapa lokasi, variasi pada komposisi sedimen sepanjang dan melintang sungai dapat berupa pasir halus, pasir kasar, kerikil, maupun batuan. Hal ini menunjukkan bahwa proses angkutan sedimen bergantung pada banyak faktor yang meliputi variasi ukuran, kepadatan, bentuk, dan kebulatan butiran. Ukuran butiran dan variasi gradasi tidak hanya penting bagi perkembangan morfologi sungai secara alamiah, tetapi mempunyai pengaruh yang besar dalam perancangan bangunan sungai.

Dasar sungai selalu tersusun dari campuran sedimen tidak seragam dan distribusi ukuran butir sedimen dalam fase terangkut secara umum lebih halus daripada distribusi material dasar akibat *selective transport* (Almedeij, 2002). Hal ini membuat prakiraan angkutan sedimen pada sungai-sungai alamiah menjadi sulit. Untuk mempertimbangkan pengaruh ketidakeragaman material da-

sar pada angkutan sedimen, berbagai ukuran representatif material dasar telah digunakan untuk menghitung laju angkutan sedimen. Ukuran representatif yang sering digunakan adalah berdasar pada: (1) diameter median material dasar, d_{50} ; (2) diameter material dasar, d_{35} , yang mana 35% adalah lebih halus sebagaimana diusulkan Einstein (1944) dan Acker and White (1973); dan (3) diameter rata-rata yang didefinisikan oleh Meyer-Peter and Muller (1948) sebagai $d_m = \sum \Delta P_{bi} d_i$, dimana ΔP_{bi} adalah fraksi dari material dasar untuk ukuran fraksi i , dan d_i adalah diameter representatif dari material dasar pada ukuran fraksi i .

Penggunaan ukuran tunggal tertentu seperti d_{50} atau d_{35} boleh jadi tidak memadai dalam menggambarkan berbagai ukuran fraksi yang ada pada campuran sedimen. Sebagaimana diungkapkan oleh White and Day (1982) dalam Almedeij (2002), kurva gradasi dengan bentuk berbeda secara pasti akan memiliki diameter efektif yang berbeda. Kondolf and Wolman (1993) dan Bunte and Abt (2001) dalam Almedeij (2002) juga mengungkapkan bahwa ukuran butir median, d_{50} , bukan merupakan parameter yang paling sesuai untuk menggambarkan distribusi ukuran butir untuk beberapa material dasar kerikil karena distribusi ukuran

butirnya tidak mengikuti log normal, ia lebih cenderung ke partikel yang lebih halus (*skew negative*). Sedangkan Pfannkuch and Paulson (2007) mengungkapkan bahwa kekurangan penggunaan d_{50} adalah bahwa parameter d_{50} tidak dipengaruhi oleh ekstrimitas dari kurva, sehingga tidak menggambarkan keseluruhan ukuran sedimen secara baik (khususnya kurva yang menceng). Untuk sedimen bimodal, penggunaan d_{50} adalah tidak ada gunanya dan tidak disarankan.

Dalam tulisan ini, dipelajari pengaruh ketidakseragaman butiran pada angkutan sedimen dasar dengan material sedimen dasar dari sungai alamiah. Variasi yang diberikan adalah meliputi parameter diameter butiran (d_{50}), ketidakseragaman butiran (σ), debit aliran (Q), serta besarnya kemiringan dasar saluran (So). Harapannya adalah dengan penelitian ini akan semakin banyak kajian tentang angkutan butiran sedimen yang dapat memproyeksikan perilaku aliran dan gambaran tentang angkutan sedimennya. Sebagaimana diketahui bahwa dalam angkutan sedimen ada tiga parameter yang menjadi ciri karakteristik butirannya sebagaimana disampaikan oleh Brownlie (1982) dan juga dalam *lecture notes* dari MIT OCW (2007), yaitu ukuran mediannya (d_{50}) kerapatannya (ρ_s), serta deviasi standar (σ) yang menunjukkan ketidakseragaman butiran.

CARA PENELITIAN

Tulisan ini merupakan hasil penelitian yang dilakukan dengan memanfaatkan peralatan yang ada di Laboratorium Hidraulika dan Hidrologi PSIT UGM. Data yang digunakan merupakan data hasil pengukuran menggunakan alat *sediment transport flume* sepanjang 10 m dan lebar 0,6 m melalui pengaturan kemiringan dasar saluran, kecepatan dan debit aliran, yang diatur secara elektronik sesuai dengan keperluan percobaan. Penelitian ini juga menggunakan data-data sekunder dari hasil penelitian terdahulu yang diperoleh dari berbagai literatur.

Material sedimen yang digunakan dalam percobaan laboratorium ini merupakan material alami dari sedimen non kohesif yang terdiri dari material dasar I, material dasar II dan material dasar III. Ketiga jenis material dasar tersebut menggambarkan kondisi material berbutir tidak seragam dari kasar sampai halus yang diambil dari sungai Krasak. Dalam percobaan ini digunakan delapan variasi kemiringan untuk mengetahui jumlah sedimen yang terangkut selama waktu pengaliran. Pengukuran dilakukan sebanyak 44 kali running untuk ketiga jenis material dasar. Untuk setiap running, data yang diperoleh mempunyai kode yang terdiri dari enam digit yang terdiri dari huruf dan angka. Kode huruf pertama K menunjukkan material, kode huruf kedua S menunjukkan kemiringan dasar (*slope*), dan kode huruf ketiga Q menunjukkan debit. Adapun angka-angka yang ditambahkan di belakang kode huruf menunjukkan urutan variasinya.

TINJAUAN PUSTAKA

Distribusi Ukuran Butir

Parameter-parameter distribusi ukuran butir material sedimen dasar diekspresikan dalam satuan mm maupun \square . Hitungan untuk konversi satuan dari mm ke \square adalah $\square = \log(D_i)/0,301 = -3,3219 \log(D_i)$, sedangkan untuk konversi dari satuan \square ke mm dihitung dengan $D_i = 2^{\square}$. Misalnya untuk $D = 64$ mm maka $-3,3219 \log(64) = -3,3219 \cdot 1,8062 = 6,0$. Dari data parameter distribusi frekuensi ukuran butir dapat dilakukan perhitungan terhadap nilai ketidakseragaman butiran. Beberapa parameter ke-tidakseragaman yang sering digunakan untuk menilai ketidakseragaman butiran ada beberapa metode, diantaranya adalah metode dari Trask (1932), Inman (1952), Folk & Ward (1957), Shen and Rao (1991), dan Simon and Senturk (1992). Persamaan yang digunakan adalah; Metode Trask

$$S_{G,T} = \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}}; \text{ Metode Inman (1952) } S_I = \frac{Q_{24} - Q_{16}}{2}; \text{ Metode Folk \& Ward (1957) } S_{F\&W} = \left(\frac{Q_{24} - Q_{16}}{4}\right) + \left(\frac{Q_{95} - Q_5}{6,6}\right);$$

$$\text{Metode Shen and Rao (1991) : } G = 0,5 * \left[\frac{d_{24}}{d_{20}} + \frac{d_{50}}{d_{10}}\right]; \text{ dan}$$

$$\text{Simon and Senturk (1992) : } \sigma_g = \sqrt{\frac{d_{24}}{d_{16}}} \text{ (Wilcock, 2006);}$$

Parameter ketidakseragaman butiran ditunjukkan dengan kriteria-kriteria : $\sigma_g > 1$ (butiran tidak seragam); $G > 1,2$ (butiran tidak seragam); $S_{G,T} = 1$ (butiran seragam, material sedimen alami $S_{G,T}$ antara 2 sampai 4,5); $S_{F\&W} > 1$ (butiran tidak seragam); $S_I > 0,5$ (butiran tidak seragam), $S_I \leq 0,5$ (butiran seragam).

Angkutan Sedimen Dasar

Untuk menghitung angkutan sedimen dasar, dapat digunakan beberapa persamaan yang telah dikemukakan beberapa peneliti, diantaranya adalah persamaan dari Engelund and Hansen (1967) dan persamaan Brownlie (1981). Engelund and Hansen (1967) mengemukakan formula angkutan sedimen seperti dalam persamaan (1) berikut (Brownlie, 1981) berikut ini.

$$C_c = 0,05 * \left(\frac{\rho_s}{\rho_s - \rho}\right) * \left(\frac{v^* So}{\sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho}} * g * d_{50}}\right) * \left(\frac{\rho * R_b * So}{(\rho_s - \rho) * d_{50}}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

dimana C_c adalah konsentrasi sedimen terangkut (ppm); V adalah kecepatan aliran (m/s); So adalah kemiringan dasar saluran; g adalah percepatan gravitasi (m/s²); R_b adalah jari-jari hidraulik (m); d_{50} adalah diameter median (m); ρ_s adalah kerapatan sedimen (kg/m³); dan ρ adalah kerapatan air (kg/m³). Persamaan Engelund and Hansen (1967) dikembangkan berdasarkan pada 116 data *flume* dari Guy et al. (1966). Data *flume* ini meliputi sedimen dengan diameter 0,19; 0,27; 0,45; dan 0,93 mm dengan kedalaman aliran hingga 0,34 m (Molinas and Wu, 2001).

Persamaan Engelund and Hansen (1967) akan digunakan sebagai alat analisa hitungan dalam penelitian ini melalui variasi penggunaan diameter butirannya. Disamping menggunakan d_{50} , parameter diameter butiran dalam persamaan tersebut juga akan dicoba disubstitusi dengan parameter diameter representatif ekuivalen (d_e) dan diameter representatif variabel (dev), serta hasil hitungan angkutan menggunakan d_{50} akan dikoreksi dengan mengalikannya dengan faktor ukuran gradasi K_d . Parameter diameter representatif ekuivalen (d_e) adalah sebagaimana ditunjukkan oleh Molinas and Wu (2001) seperti dalam persamaan (2) berikut ini.

$$d_e = \frac{1,8 * d_{50}}{1 + 0,8 * \left(\frac{v^*}{\omega_{50}}\right)^{0,1} * (\sigma - 1)^{2,2}} \quad (2)$$

dimana v^* = kecepatan geser (m/s), σ = koefisien ketidakseragaman dari material dasar, dan ω_{50} = kecepatan jatuh (*fall velocity*) (m/s) sedimen untuk ukuran partikel d_{50} . Besarnya nilai *fall velocity* (ω_{50}) dihitung berdasarkan pendekatan dari Rubey (1933). Molinas and Wu (2001) mengembangkan persamaan diameter representatif ekuivalen (d_e) untuk material sedimen dasar pasir dengan $d_{50} < 2$ mm.

Sedangkan diameter representatif variabel (*dev*) sebagaimana didefinisikan oleh Wu and Molinas (2004) ditunjukkan oleh persamaan (3) berikut ini.

$$d_{ev} = d_{50} * e^{-0,5*b*(\ln \sigma)^2} \quad (3)$$

dimana σ = koefisien ketidakseragaman dari material dasar. Faktor koreksi ukuran gradasi (*Kd*) ditunjukkan seperti persamaan (4) di bawah ini.

$$K_d = e^{0,5*(b*\ln \sigma)^2} \quad (4)$$

dimana σ = koefisien ketidakseragaman dari material dasar. Faktor koreksi ukuran gradasi dihitung dengan nilai *b* diambil sebesar 1,2 (Wu and Molinas, 2004). Faktor koreksi ukuran gradasi *Kd* diterapkan untuk sedimen

$$C_{ppm} = 7155cf(F_g - F_{go})^{1,978} S_o^{0,6601} \left(\frac{R_b}{d_{50}}\right)^{-0,3301} \quad (5)$$

dimana *cf* = 1 untuk data laboratorium dan *cf* = 1,268 untuk data lapangan. Bilangan Froude butiran (*Fg*): $F_g = \frac{v}{\sqrt{\left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right)gd_{50}}}$

bilangan Froude butiran kritis (*Fgo*):

$$F_{go} = 4,59\tau_{*o}^{0,5293} S^{-0,1405} \sigma^{-0,1606}; \quad \tau_{*o} = 0,22Y + 0,06(10)^{-7,7Y}$$

dimana: $Y = \left(\sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho}} R_g\right)^{-0,6}$; bilangan Reynolds butiran (*Rg*)

$$R_g = \frac{\sqrt{gd_{50}^3}}{\nu}$$

Analisa hitungan dengan menggunakan persamaan Brownlie (1981) dilakukan dengan memvariasikan faktor ketidakseragaman butiran (σ) menggunakan kelima koefisien ketidakseragaman $S_{F\&W}$, S_b , $S_{G,T}$, σ_g , dan *G*. Faktor koreksi angkutan sedimen dari konsentrasi terangkut (*ppm*) ke satuan dalam debit berat terangkut (*kg/s*) adalah $q_c = Cc * Q * \rho_s$; dimana *qc* adalah debit sedimen terangkut (*kg/s*), *Cc* adalah konsentrasi sedimen terangkut (*ppm*), *Q* adalah debit aliran (*m³/s*), dan ρ_s adalah rapat massa sedimen (*kg/m³*).

HASIL DAN PEMBAHAS

Berdasarkan hasil analisa parameter ketidakseragaman butiran untuk material dasar sebagaimana pada Tabel 1 dapat disimpulkan bahwa material Krasak I, Krasak II, dan Krasak III termasuk butiran tidak seragam ($S_{F\&W} < S_b < S_{G,T} < \sigma_g < G$), sedangkan hasil analisis berat jenis partikel (*specific gravity*) (γ) untuk ketiga jenis butiran adalah Krasak 1 = 2,67172 *gr/cm³*; Krasak 2 = 2,66896 *gr/cm³*; Krasak 3 = 2,66405 *gr/cm³*.

Berdasarkan klasifikasi butiran diameter referensi (*d₅₀*) menurut AGU (*American Geophysical Union*) dalam Wilcock (2006), maka material dasar Krasak 1 dengan *D₅₀* = 10,2 mm termasuk kerikil sedang, material dasar Krasak 2 dengan *D₅₀* = 0,9 mm termasuk pasir kasar, dan material dasar Krasak 3 dengan *D₅₀* = 0,7 mm termasuk pasir kasar.

Metode *discrepancy ratio* digunakan untuk menunjukkan kesesuaian yang baik (*goodness of fit*) antara hasil-hasil angkutan terhitung (*qc*) terhadap angkutan terukur (*qm*). Nilai *discrepancy ratio* dihitung dengan persamaan (6) berikut (Yang, 2006).

$$ri = \frac{q_{ci}}{q_{mi}} \quad (6)$$

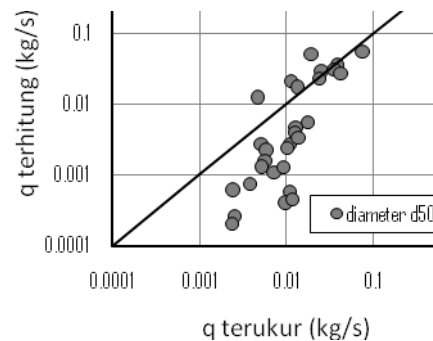
dimana *ri* = nilai *discrepancy ratio* data ke *i*, *q_{ci}* = angkutan sedimen dasar hasil hitungan (*kg/s*) data ke *i*, *q_{mi}* = angkutan sedimen dasar hasil pengukuran (*kg/s*) data ke *i*.

Pada setiap grafik hubungan antara *qc* terhitung dan *qm* terukur, garis diagonal merupakan garis kesesuaian sempurna (*line of perfect agreement*) dimana nilai *discrepancy ratio* = 1. Untuk mengukur akurasi hasil hitungan berdasarkan jumlah data yang berada pada nilai *r* tertentu, maka digunakan range nilai *r* antara 0,75-1,25; 0,50-1,50; 0,25-1,75; dan 0,50-2,0 (Yang, 2006). Plotting titik-titik data pada setiap grafik menunjukkan penyebaran nilai-nilai *discrepancy ratio* (*r*) untuk 29 data penelitian yang digunakan.

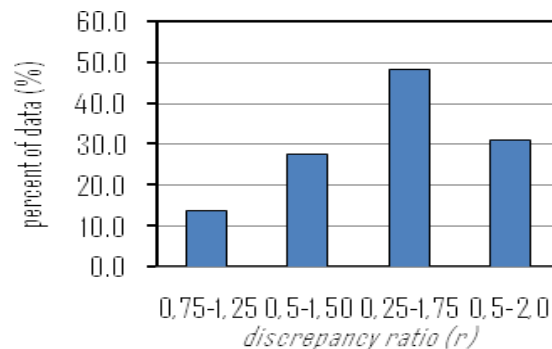
Tabel 1. Ketidakteragaman butiran material dasar

Metode	Kriteria	Material Dasar		
		1	2	3
Trask (1932)	$S_{G,T} = 1$, butiran seragam. Material alami $S_{G,T}$ antara 2 - 4,5	4,25	2,87	2,13
Inman (1932)	$S_b > 0,5$; butiran tidak seragam $S_b \leq 0,5$; butiran seragam	2,92	2,03	1,55
Folk & Ward (1957)	$S_{F\&W} > 0,5$; butiran tidak seragam $S_{F\&W} \leq 0,5$, butiran seragam	2,55	1,81	1,48
Shen and Rao (1991)	$G > 1,2$; butiran tidak seragam	9,63	5,05	3,07
Simon and Senturk (1992)	$\sigma_g > 1$, butiran tidak seragam	7,56	4,07	2,93

Perbandingan angkutan sedimen terukur (*qm*) dan terhitung (*qc*) berdasarkan *d₅₀* pada persamaan Engelund and Hansen (1967)



Gambar 1. Perbandingan *q* terhitung terhadap *q* terukur menggunakan *d₅₀* pada persamaan Engelund and Hansen (1967)



Gambar 2. Jumlah persen data dalam range nilai *r* untuk parameter *d₅₀* berdasarkan persamaan Engelund and Hansen (1967)

Gambar 1 merupakan gambar perbandingan angkutan material dasar terukur (qm) dan material dasar terhitung (qc) berdasarkan d_{50} dan Tabel 2 merupakan nilai *discrepancy ratio* dan jumlah persen data yang berada dalam range nilai r untuk perhitungan menggunakan d_{50} . Berdasarkan data pada Tabel 2, nilai-nilai banding yang ditunjukkan oleh nilai r memiliki nilai minimal 0,039 dan maksimal 2,596; sedangkan rata-ratanya 0,491 yang berarti bahwa sebagian besar data hasil hitungan berada di

bawah nilai hasil pengukuran. Penyebaran grafik ini dengan divisualisasikan dalam Gambar 2 menunjukkan besaran jumlah persen data yang berada dalam range nilai r yang diberikan. Tampak bahwa jumlah persen data terbesar adalah 48,28% pada range nilai r antara 0,25 – 1,75. Sedangkan pada ketiga nilai range yang lain, jumlah per-sen datanya lebih kecil.

Tabel 2. Nilai *discrepancy ratio* (r) dan jumlah persen data yang berada dalam range nilai r yang diberikan untuk perhitungan menggunakan d_{50}

Diameter	Discrepancy ratio (r)			Jml data dalam range r (%)			Jumlah	
	Max	Mean	Min	0,75-1,25	0,5-1,50	0,25-1,75		0,5-2,0
btrn								ttl data
d_{50}	2,596	0,614	0,0391	13,79	27,59	48,28	31,03	29

Pengaruh Ketidakeragaman Butiran Berdasarkan Perbandingan angkutan sedimen terukur (qm) dan terhitung (qc) untuk parameter d_e , dev dan Faktor K_d

Gambar 3 merupakan gambar perbandingan angkutan material dasar terhitung (qc) dan material dasar terukur (qm) terhadap koefisien ketidakeragaman berdasarkan diameter ekuivalen d_e , diameter variabel dev , dan faktor koreksi K_d . Data dalam Tabel 3 adalah rangkuman perbandingan akurasi hitungan yang digunakan untuk analisis. Nilai *discrepancy ratio*, r , dan rata-rata *discrepancy ratio*, \bar{r} , antara angkutan sedimen hasil hitungan dan hasil pengukuran digunakan untuk menunjukkan keakuratan masing-masing hasil hitungan.

Dari Tabel 3 dapat dilihat bahwa koefisien G dan σ_g memberikan rata-rata *discrepancy ratio* masing-masing 4,227 dan 2,203. Hal ini menunjukkan bahwa kedua metode, pada reratanya, memprakirakan laju angkutan sedimen secara berlebihan (*overestimate*). Rata-rata *discrepancy ratio* untuk koefisien $S_{F\&W}$ dan S_I adalah 0,405 dan 0,492. Hal ini menunjukkan bahwa hitungan dengan koefisien $S_{F\&W}$ dan S_I memprakirakan lebih rendah (*underpredict*) laju angkutan sedimen. Sedangkan rata-rata *discrepancy ratio* pada koefisien $S_{G,T}$ adalah 1,187. Nilai ini memberikan prakiraan yang paling bagus karena berarti akurasi angkutan hasil hitungan mendekati angkutan hasil pengukuran.

Tabel 3 yang divisualisasikan secara grafis pada Gambar 4 untuk jumlah persen data yang berada pada range nilai r yang diberikan menunjukkan bahwa hitungan dengan menggunakan koefisien G memberikan jumlah data yang terbesar pada range r antara 0,25 – 1,75 sebesar 48,28%, diikuti masing-masing oleh koefisien $S_{G,T}$, σ_g , $S_{F\&W}$, dan S_I sebesar 44,83%; 44,83%; 31,03%; dan 27,59% pada range r yang sama. Hasil-hasil statistik ini menjelaskan bahwa hitungan dengan menggunakan parameter d_e dengan koefisien ketidakeragaman G memberikan prediksi yang paling baik, sementara koefisien S_I memberikan prediksi paling buruk. Dari hasil ini juga tampak bahwa perhitungan angkutan sedimen menggunakan persamaan Engelund and Hansen (1967) dengan diameter d_e tidak memberikan prediksi yang lebih baik dibanding perhitungan menggunakan diameter d_{50} (akurasi 48,28%)

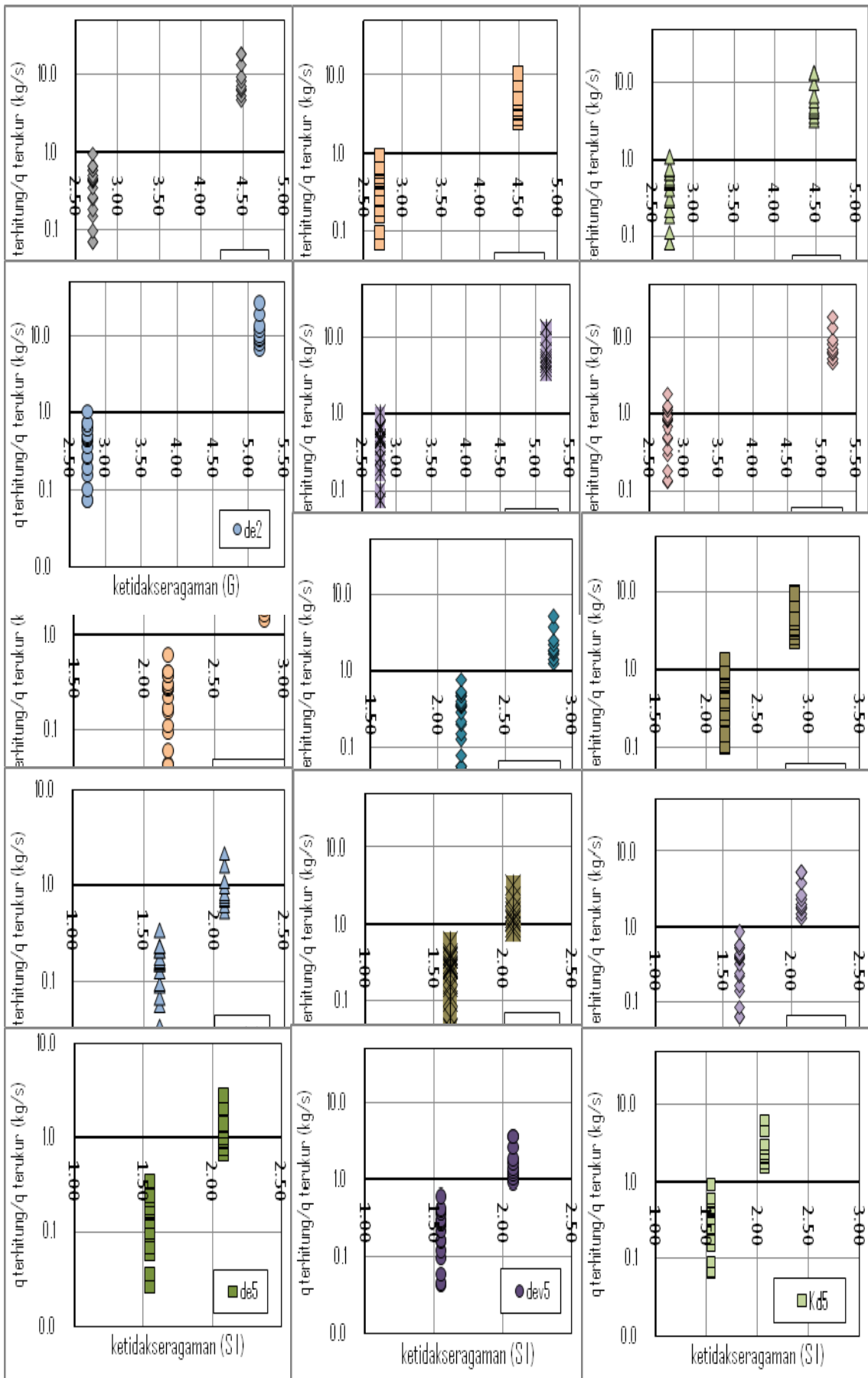
Pada Gambar 3 dan Tabel 3 untuk faktor K_d terlihat bahwa koefisien G , σ_g dan $S_{G,T}$ memberikan rata-rata *discrepancy ratio* masing-masing 3,858; 2,670 dan 2,028. Hal ini menunjukkan bahwa ketiga metode memprakirakan laju angkutan sedimen secara berlebihan (*overestimate*). Rata-rata *discrepancy ratio* untuk koefisien $S_{F\&W}$ dan S_I adalah 1,209 dan 1,375. Kedua nilai ini cukup *moderate*, mendekati 1, yang berarti bahwa akurasi angkutan sedimen hasil hitungan cukup bagus, mendekati angkutan hasil pengukuran.

Tabel 3 parameter K_d yang divisualisasikan secara grafis pada Gambar 4 untuk jumlah persen data yang berada pada range nilai r yang diberikan menunjukkan bahwa hitungan dengan menggunakan koefisien G dan $S_{G,T}$ memberikan jumlah data yang terbesar pada range r antara 0,25 – 1,75 masing-masing sebesar 51,72%, diikuti oleh koefisien $S_{G,T}$, σ_g , dan G masing-masing sebesar 48,28% pada range r yang sama. Hasil-hasil statistik ini menjelaskan bahwa hitungan dengan menggunakan faktor koreksi K_d dengan kedua koefisien ketidakeragaman G dan $S_{G,T}$ memberikan prediksi yang lebih baik dibanding hitungan menggunakan d_{50} , sementara koefisien lainnya memberikan prediksi yang besarnya sama dengan menggunakan d_{50} .

Dari Tabel 3 untuk parameter dev dapat dilihat bahwa nilai pada koefisien G dan σ_g memberikan rata-rata *discrepancy ratio* masing-masing 2,948 dan 1,743. Hal ini menunjukkan bahwa perhitungan yang menggunakan kedua metode memprakirakan laju angkutan sedimen secara berlebihan (*overestimate*). Rata-rata *discrepancy ratio* untuk koefisien $S_{G,T}$, $S_{F\&W}$ dan S_I adalah 1,027, 0,640 dan 0,710. Hal ini menunjukkan bahwa hitungan dengan koefisien $S_{F\&W}$ dan S_I memprakirakan lebih rendah (*underpredict*) laju angkutan sedimen. Sedangkan rata-rata *discrepancy ratio* pada koefisien $S_{G,T}$ sebesar 1,027 memberikan prakiraan yang paling bagus karena berarti akurasi angkutan hasil hitungan mendekati angkutan hasil pengukuran.

Tabel 3 untuk dev yang divisualisasikan secara grafis pada Gambar 4 untuk jumlah persen data yang berada pada range nilai r yang diberikan menunjukkan bahwa hitungan dengan menggunakan koefisien $S_{F\&W}$ memberikan jumlah data yang terbesar sejumlah 62,07% pada range r antara 0,25 – 1,75, diikuti masing-masing oleh koefisien S_I , $S_{G,T}$, σ_g , dan G sebesar 58,62%; 51,72%; 48,28%; dan 48,28% pada range r yang sama. Hasil-hasil statistik ini menjelaskan bahwa hitungan dengan menggunakan parameter dev dengan koefisien ketidakeragaman $S_{F\&W}$ memberikan prediksi yang paling baik, sementara koefisien σ_g memberikan prediksi paling buruk.

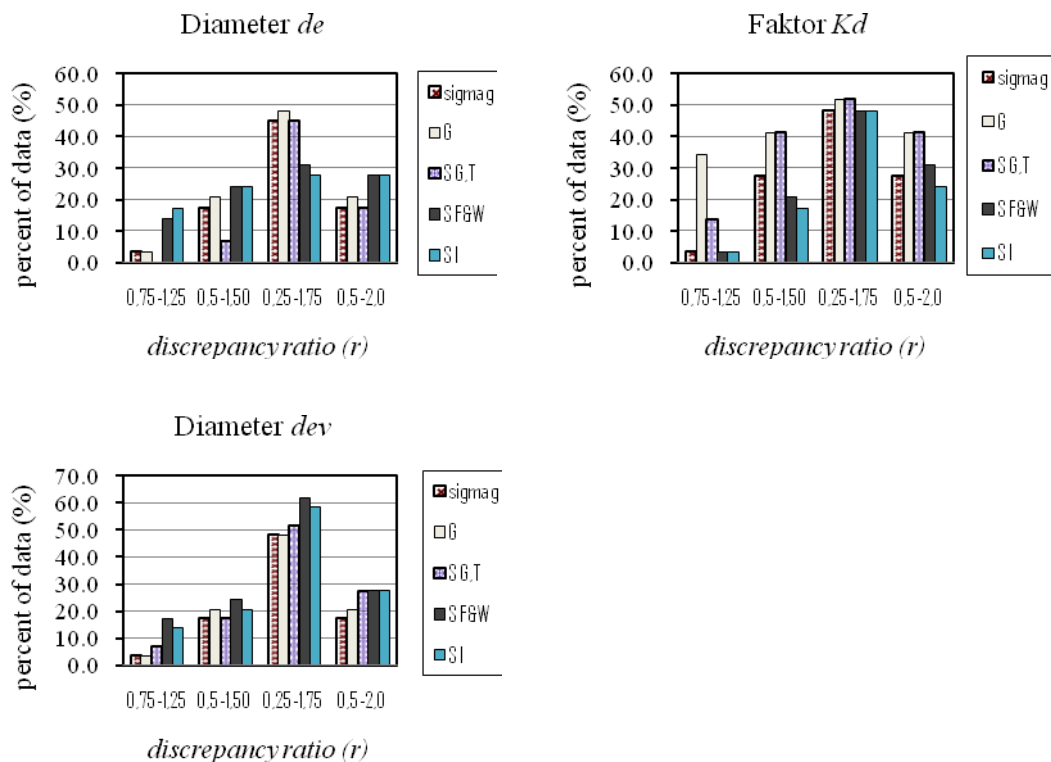
Dari hasil ini juga tampak bahwa perhitungan angkutan sedimen menggunakan persamaan Engelund and Hansen (1967) dengan diameter dev untuk ketiga koefisien ketidakeragaman ($S_{F\&W}$, S_I , dan $S_{G,T}$) memberikan prediksi yang lebih baik dibanding perhitungan menggunakan diameter d_{50} (akurasi 48,28%).



Gambar 3. Hubungan *discrepancy ratio* (r) dan koefisien ketidakeragaman untuk parameter d_e , d_{ev} dan faktor K_d berdasarkan persamaan Engelund and Hansen (1967)

Tabel 3. Nilai *discrepancy ratio* (r) dan jumlah persen data yang berada pada range nilai r yang diberikan pada perhitungan menggunakan metode Engelund and Hansen (1967)

Metode hitungan	Prmtr diameter	Ktdk srgmn	<i>Discrepancy ratio</i> (r)			Jmlh data dalam range r (%)				Jumlah ttl data
			Max	Mean	Min	0,75-1,25	0,5-1,50	0,25-1,75	0,5-2,0	
Engelund and Hansen (1967)	de	r σ_g	13,397	2,203	0,054	3,448	17,241	44,828	17,241	29
		r G	19,165	4,227	0,056	3,448	20,690	48,276	20,690	29
		r $S_{G,T}$	5,733	1,187	0,042	0,000	6,897	44,828	17,241	29
		r $S_{F\&W}$	1,963	0,405	0,024	13,793	24,138	31,034	27,586	29
		r S_I	2,350	0,492	0,024	17,241	24,138	27,586	27,586	29
	Kd	r σ_g	13,319	2,670	0,080	3,448	27,586	48,276	27,586	29
		r G	18,633	3,858	0,132	34,483	41,379	51,724	41,379	29
		r $S_{G,T}$	9,180	2,028	0,099	13,793	41,379	51,724	41,379	29
		r $S_{F\&W}$	5,393	1,209	0,063	3,448	20,690	48,276	31,034	29
		r S_I	6,251	1,375	0,066	3,448	17,241	48,276	24,138	29
	dev	r σ_g	10,027	1,743	0,071	3,448	17,241	48,276	17,241	29
		r G	13,110	2,948	0,073	3,448	20,690	48,276	20,690	29
		r $S_{G,T}$	5,047	1,027	0,056	6,897	17,241	51,724	27,586	29
		r $S_{F\&W}$	3,243	0,640	0,043	17,241	24,138	62,069	27,586	29
		r S_I	3,581	0,710	0,044	13,793	20,690	58,621	27,586	29



Gambar 4. Jumlah persen data dalam range nilai r untuk parameter de , dev dan faktor Kd berdasarkan persamaan Engelund and Hansen (1967)

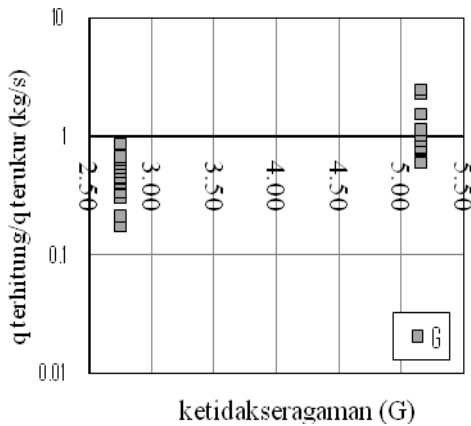
Tabel 4. Nilai *discrepancy ratio* (r) dan jumlah persen data yang berada pada range nilai r yang diberikan pada perhitungan menggunakan metode Brownlie (1981)

Ktdk srgmn	<i>Discrepancy ratio</i> (r)			Jml data dalam range r (%)				Jumlah
	Max	Mean	Min	0,75-1,25	0,5-1,50	0,25-1,75	0,5-2,0	total data
r G	2,500	0,719	0,1752	20,69	51,72	82,76	55,17	29

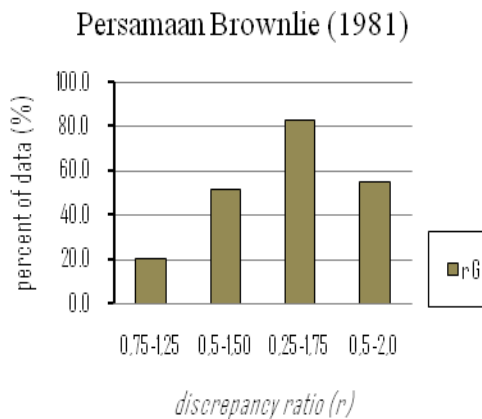
Pengaruh Ketidakteragaman Berdasarkan Angkutan Sedimen Dasar Menurut Brownlie (1981)

Gambar 5 merupakan gambar rasio q terhitung dan q terukur terhadap koefisien ketidakteragaman G berdasarkan persamaan Brownlie (1981). Pemaparan Gambar 5 didukung dengan data-data hasil perhitungan nilai *discrepancy ratio* dan jumlah persen data yang berada pada range nilai *r* yang diberikan seperti pada Tabel 4.

Berdasarkan data dalam Tabel 4 yang divisualisasikan dalam Gambar 6, tampak bahwa nilai rata-rata *discrepancy ratio* adalah 0,719. Hasil ini memprakirakan lebih rendah (*underpredict*) laju angkutan sedimen. Berdasarkan jumlah persen data yang berada pada range nilai *r* yang diberikan, parameter ketidakteragaman G memberikan hasil 82,76% data pada rentang nilai *r* antara 0,25 – 1,75. Secara umum, penyebaran titik-titik data berdasarkan perhitungan dengan persamaan Brownlie (1981) memberikan hasil lebih baik dibanding dengan perhitungan menggunakan persamaan Engelund & Hansen (1967).



Gambar 5. Hubungan qc/qm terhadap Ketidakteragaman G menggunakan persamaan Brownlie (1981)

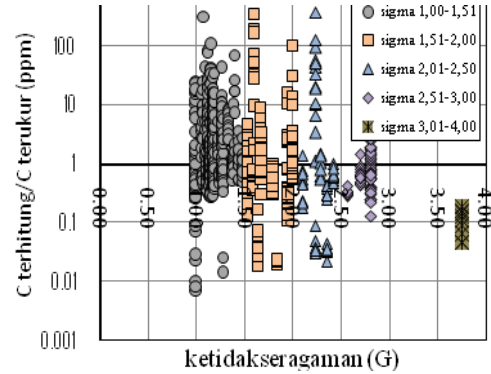


Gambar 6. Jumlah persen data dalam range nilai *r* berdasarkan *d*₅₀ persamaan Brownlie (1981)

Pengaruh ketidakteragaman butiran berdasarkan data-data sekun-der dari 20 peneliti dengan 823 data (Brownlie, 1981) adalah se-perti pada Gambar 7, Gambar 8 dan Tabel 5. Parameter ke-tidakteragaman yang digunakan adalah G dimana $G = 0,5 * \left[\frac{d_{84}}{d_{50}} + \frac{d_{50}}{d_{16}} \right]$. Pada range nilai *r* antara 0,25-1,75; rumus Engelund and Hansen (1967) memberikan nilai-nilai per-

sentase data berturut-turut pada $\sigma = 1,00-1,50$ sebesar 59,66%; $\sigma = 1,51-2,00$ sebesar 52,08%; $\sigma = 2,01-2,50$ sebesar 46,03%; $\sigma = 2,51-3,00$ sebesar 76,19%; dan $\sigma = 3,01-4,00$ sebesar 0,00%.

Pada range nilai *r* yang sama, rumus Brownlie (1981) memberikan nilai persentase data berturut-turut pada $\sigma = 1,00-1,50$ sebesar 71,70%; $\sigma = 1,51-2,00$ sebesar 55,56%; $\sigma = 2,01-2,50$ sebesar 30,16%; $\sigma = 2,51-3,00$ sebesar 79,37%; dan $\sigma = 3,01-4,00$ sebesar 0,00%. Hasil ini memberikan tren yang tidak konsisten pada nilai $\sigma = 2,51 - 3,00$. Secara umum rumus Brownlie (1981) memberikan hasil prakiraan yang lebih baik dibandingkan dengan rumus Engelund and Hansen (1967).



Gambar 7. Hubungan antara *r* dan G untuk persamaan Engelund & Hansen (1967)

Tabel 5. Perbandingan persen data dalam Range *r* untuk kedua persamaan

Range σ	Jml data dlm range <i>r</i> (%)		Jumlah total data
	0,25-1,75	B	
$\sigma = 1,00-1,50$	59,66	71,70	523
$\sigma = 1,51-2,00$	52,08	55,56	144
$\sigma = 2,01-2,50$	46,03	30,16	63
$\sigma = 2,51-3,00$	76,19	79,37	63
$\sigma = 3,01-4,00$	0,00	0,00	9

Keterangan : E-A = Engelund and Hansen
B = Brownlie

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisa data dan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan bahwa dari hasil analisa parameter ketidakteragaman butiran (σ , G, $S_{G,T}$, S_b dan $S_{F\&W}$) untuk material dasar, material Krasak I, Krasak II, dan Krasak III termasuk butiran tidak seragam dimana $S_{F\&W} < S_b < S_{G,T} < \sigma < G$.

Berdasarkan persamaan Engelund and Hansen (1967), akurasi hitungan angkutan sedimen dengan menggunakan diameter representatif ekquivalen (*de*) pada koefisien ketidakteragaman G adalah paling bagus dibandingkan dengan hitungan menggunakan koefisien ketidakteragaman $S_{F\&W}$, S_b , σ dan $S_{G,T}$. Nilai *r* yang terbaik sejumlah 48,28% data, sama dengan hasil perhitungan menggunakan *d*₅₀. Pada perhitungan angkutan sedimen dengan menggunakan faktor koreksi ukuran gradasi *Kd*, akurasi paling baik adalah pada koefisien ketidakteragaman G dan $S_{G,T}$ dengan nilai *r* pada range 0,25-1,75 sejumlah 51,28% data.

Perhitungan menggunakan diameter *dev* untuk tiga koefisien ketidakteragaman ($S_{F\&W}$, S_b , $S_{G,T}$) memberikan prediksi yang

lebih baik dibanding perhitungan menggunakan diameter d_{50} (akurasi 48,28%). Perhitungan dengan menggunakan koefisien $S_{F\&W}$ memberikan jumlah data 62,07% pada range r antara 0,25 – 1,75, diikuti masing-masing oleh koefisien S_I , $S_{G,T}$, σ , dan G sebesar 58,62%; 51,724%; 48,28%; dan 48,28% pada range r yang sama. Hasil-hasil statistik ini menjelaskan bahwa hitungan dengan koefisien ketidakteraturan $S_{F\&W}$ memberikan prediksi yang paling baik, sementara koefisien σ memberikan prediksi paling buruk.

Secara umum, perhitungan dengan persamaan Brownlie (1981) memberikan hasil lebih baik dibanding dengan perhitungan menggunakan persamaan Engelund & Hansen (1967). Jumlah persen data yang berada pada range nilai r antara 0,25 – 1,75 untuk koefisien ketidakteraturan G adalah sejumlah 82,76%.

DAFTAR PUSTAKA

- Almedeij, J.H. (2002). "Bedload Transport in Gravel Bed-Stream Under a Wide Range of Shields Stress." Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- Brownlie, W.R. (1982). "Prediction of Flow Depth and Sediment Discharge in Open Channels." PhD Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- Hadadin, N., Bdour, A. (2006). "Investigation in the Brownlie (1981) Sediment Transport Equation in Open Channels." *European Journal of Scientific Research*, Vol. 13 No. 2 (2006), pp. 258-266.
- Kironoto, B.A. (2006). *Transport Sedimen*, Diktat Mata Kuliah, Program Studi Teknik Sipil, Sekolah Pascasarjana UGM, Yogyakarta.
- MIT, OpenCourseWare (2006). *Special Topics : An Introduction to Fluid Motions, Sediment Transport and Current-generated Sedimentary Structures*, Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Fall 2006.
- Molinas, A., Wu, B. (2001). "Transport of Sediment in Large Sand-bed Rivers." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 39, 2001, No. 2.
- Pfannkuch, H.O., Paulson, R. (2007). *Grain Size Distribution and Hydraulic Properties*, Lecture Notes.
- Shen., H.W. and Rao., C.X. (1991). "Transport Sediment of Uniform and Nonuniform Sediment Sizes." *Federal Interagency Sedimentation Conferences*, 5th FISC, Las Vegas, Nevada.
- Sinnakaudan, S.K., et al. (2006). "Multiple Linear Regression Model for Total Bed Material Load Prediction." *Journal of Hydraulics Engineering, ASCE*, Vol. 132, No. 5, May 1, 2006.
- Wilcock, P.R. (2006). *Particle Analysis in Gravel-Bed Rivers*, Pre-Conference Workshop, The National Center for Earth-Surface Dynamics, October 2, 2006, John Hopkins University, Baltimore, Maryland
- Wu, B., Molinas, A., Julien, P.Y. (2004). "Bed-Material Load Computations for Nonuniform Sediments." *Journal of Hydraulics Engineering, ASCE*, Vol. 130, No. 10, Oktober 1, 2004.
- Yang, C.T. (2006). *Erosion and Sedimentation Manual, Chapter 3 : Noncohesive Sediment Transport*, Biro of Reclamation's Sedimentation and River Hydraulics Group, Denver, Colorado.