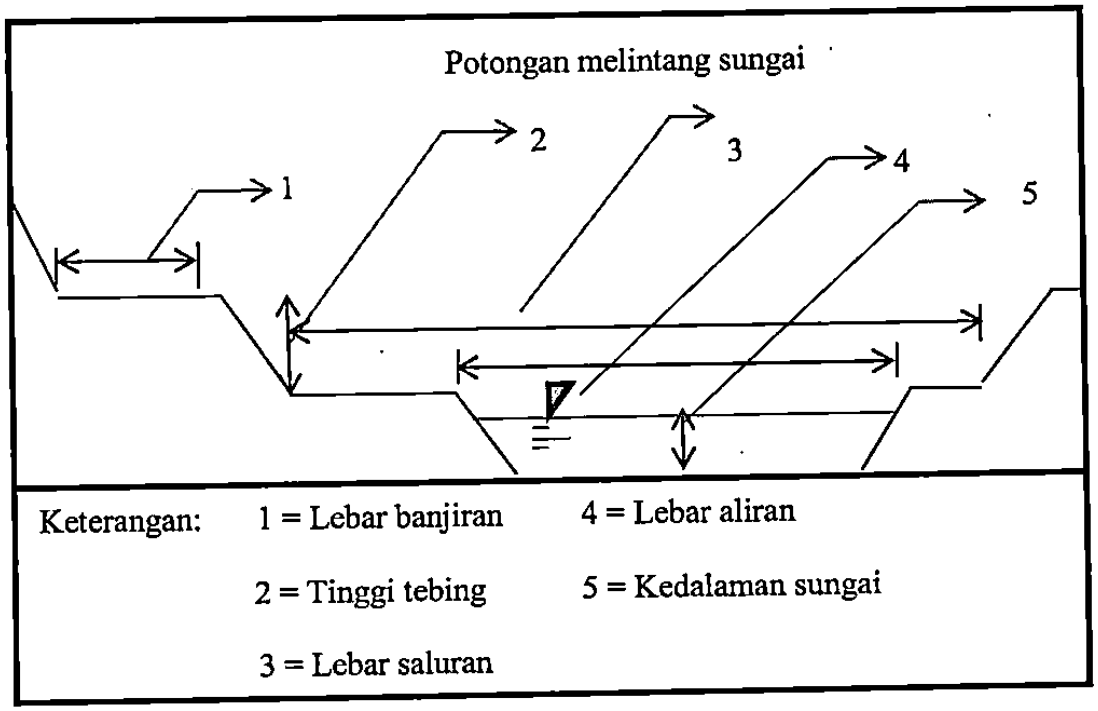
BAB III

LANDASAN TEORI

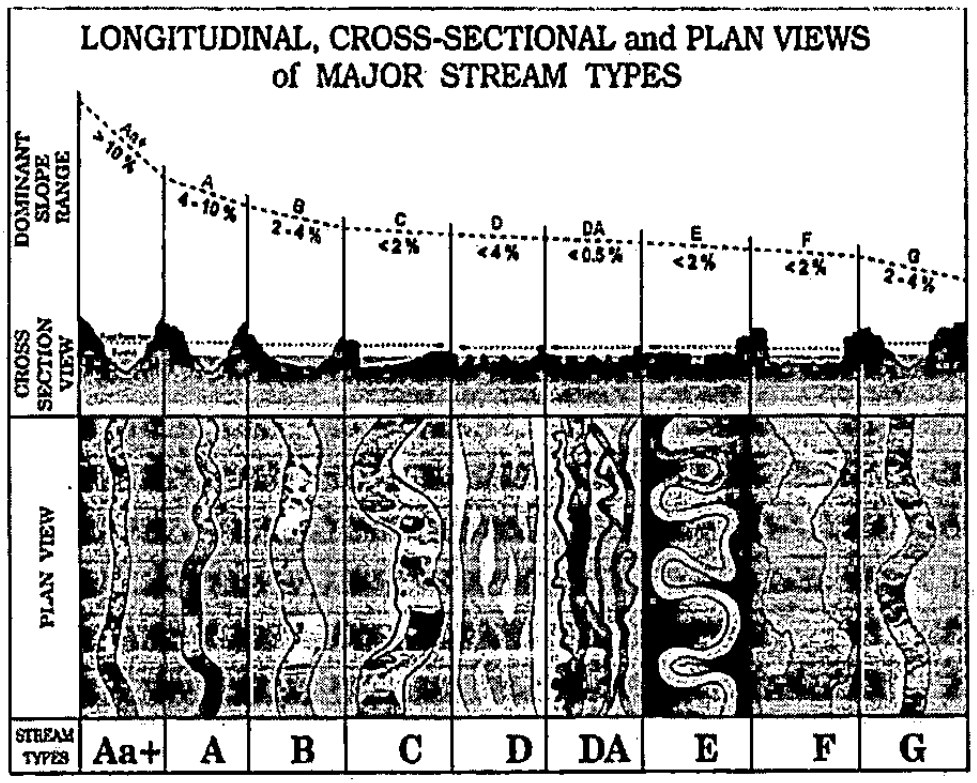
A. Morfologi sungai

Morfologi (*Morpologie*) berasal dari bahasa yunani yaitu *morpe* yang berarti bentuk dan *logos* yang berarti ilmu, dengan demikian maka morfologi berarti ilmu yang mempelajari tentang bentuk (Wikipedia, 2011). Morfologi sungai merupakan hal yang menyangkut kondisi fisik sungai tentang geometri, jenis, sifat, dan perilaku sungai dengan segala aspek perubahannya dalam dimensi ruang dan waktu, dengan demikian menyangkut sifat dinamik sungai dan lingkungannya yang saling berkaitan antara satu dengan yang lainnya. Dalam menentukan morfologi sungai, diperlukan data-data geometri sungai meliputi lebar sungai, kedalaman, penampang sungai, koordinat lokasi dan kemiringan dasar sungai.



1. Tipe-tipe morfologi sungai

Gambaran utama tipe-tipe morfologi sungai menurut Dave Rosgen (1996) adalah sebagai berikut:



Gambar 3. 2 Tipe bentuk morfologi (Rosgen, 1996)

a. Tipe sungai Aa+

Tipe sungai Aa+ memiliki kemiringan yang sangat curam (>10%), saluran berparit yang baik, memiliki rasio lebar/kedalaman (W/D *ratio*) yang rendah dan sepenuhnya dibatasi oleh saluran kecil. Bentuk dasarnya merupakan cekungan luncur atau aliran terjun (super kritis), Tipe sungai Aa+ banyak dijumpai pada dataran dengan timbunan agregat, zona pengendapan seperti aliran sungai bersalju, bentuk lahan yang secara struktural dipengaruhi oleh patahan, dan zona pengendapan yang berbatasan dengan tanah residu. Arus sungai umumnya beraliran deras atau terjun (super kritis), Tipe sungai Aa+ disebut sebagai sistem suplai

b. Tipe sungai kecil A

Tipe sungai A hampir sama dengan tipe sungai Aa+ yang telah dijelaskan sebelumnya, Yang membedakan adalah kemiringan lereng saluran mencapai 4% sampai 10% dan arus sungai umumnya merupakan cekungan dengan air kantung (*scour pool*).

c. Tipe sungai kecil B

Tipe sungai B umumnya terdapat pada tanah dengan kemiringan yang curam dan sedikit miring. Dengan bentukan lahan utama sebagai kolom belerang yang sempit, Banyak sungai tipe B adalah hasil dari zona struktural, Patahan, Sambungan, dan bagian lereng lembah yang terkontrol secara struktural menjadi lembah yang sempit yang membatasi pengembangan dataran banjir. Tipe sungai B mempunyai saluran berparit rasio lebar per kedalaman (W/D *ratio*) (< 2), *sinousitas* saluran rendah dan didominasi oleh saluran deras (super kritis). Morfologi bentuk dasar yang dipengaruhi runtuhan dan perbatasan lokal, Umumnya menghasilkan air kantung (*scour pool*) dan aliran deras serta tingkat erosi pinggir sungai yang relatif rendah.

d. Tipe sungai kecil C

Tipe sungai C terdapat pada lembah yang relatif sempit sampai lembah yang lebar berasal dari endapan alluvial. Saluran tipe C memiliki dataran banjir yang berkembang dengan baik, kemiringan saluran < 2 % dan morfologi dasar yang mengindikasikan konfigurasi cekungan. Potongan dan bentuk dari tipe sungai C dipengaruhi oleh rasio lebar per kedalaman (W/D ratio) yang umumnya (<12) dan sinusitas >1,4. Bentuk morfologi utama dari tipe sungai C adalah saluran dengan relief rendah, kemiringan rendah, sinusitas sedang, saluran berparit rendah, rasio per kedalaman tinggi, serta dataran banjir yang berkembang baik.

e. Tipe sungai kecil D

Tipe sungai D mempunyai konfigurasi yang unik sebagai sistem saluran yang menunjukkan pola berjalin dengan rasio lebar per kedalaman

sama dengan lereng lembah. Tingkat erosi yang sangat tinggi dan rasio lebar saluran yang sangat rendah, dengan suplai sedimen yang tidak terbatas. Bentuk saluran merupakan tipe pulau yang bervegetasi. Pola saluran berjalin dapat berkembang pada daerah bermaterial sangat kasar yang terletak pada lembah dengan lereng yang cukup curam, sampai lembah dengan gradien yang rendah, rata, dan sangat bebas yang berisi material yang sangat halus.

f. Tipe Sungai Kecil DA (*Branastomosis*)

Tipe sungai DA (*Branastomosis*) adalah suatu sistem saluran berjalin dengan gradien yang sangat rendah dan lebar aliran setiap saluran bervariasi. Tipe sungai DA merupakan suatu sistem sungai stabil dan memiliki banyak saluran dan rasio lebar per saluran serta *sinousitas* bervariasi dari sangat rendah sampai sangat tinggi.

g. Tipe Sungai E

Tipe sungai E merupakan perkembangan tipe sungai F, yaitu mulai saluran yang lebar, berparit, dan berkelok mengikuti perkembangan daerah banjir dan pemulihan vegetasi dari bekas saluran F. Tipe sungai kecil E agak berparit, Yang menunjukkan rasio lebar per kedalaman (*W/D ratio*) tertinggi dari semua tipe sungai. Tipe sungai E adalah suatu cekungan konsisten yang menghasilkan jumlah cekungan dari setiap unit jarak saluran, sistem sungai E umumnya terjadi di lembah aluvial yang mempunyai elevasi rendah.

h. Tipe Sungai F

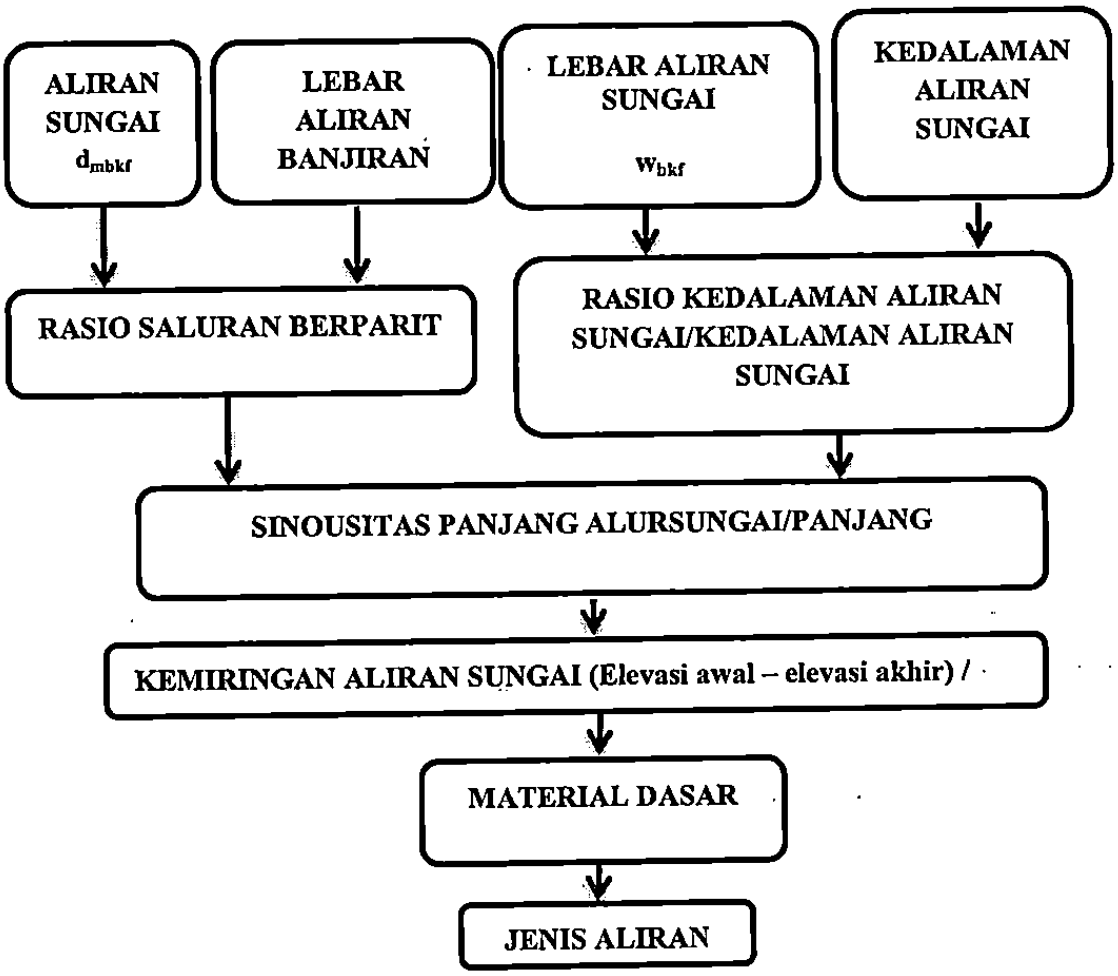
Tipe sungai F adalah saluran berkelok yang berparit klasik, mempunyai elevasi yang relatif rendah yang berisi batuan yang sangat lapuk atau mudah terkena erosi. Karakteristik sungai F adalah mempunyai rasio lebar per kedalaman saluran (*W/D ratio*) yang sangat tinggi dan

i. Tipe sungai G

Tipe sungai G adalah saluran bertingkat, berparit, sempit dan dalam dengan sinusitas tinggi sampai sederhana. Kemiringan saluran umumnya >0,02, meskipun saluran dapat mempunyai lereng yang landai dimana sebagai lereng yang dipotong ke bawah. Tipe sungai G mempunyai laju erosi tepi yang sangat besar, suplai sedimen yang tinggi, lereng saluran yang sederhana sampai curam, rasio lebar per kedalaman (*W/D ratio)* yang rendah, beban dasar tinggi dan laju transport sedimen terlarut sangat tinggi.

2. Menentukan morfologi sungai

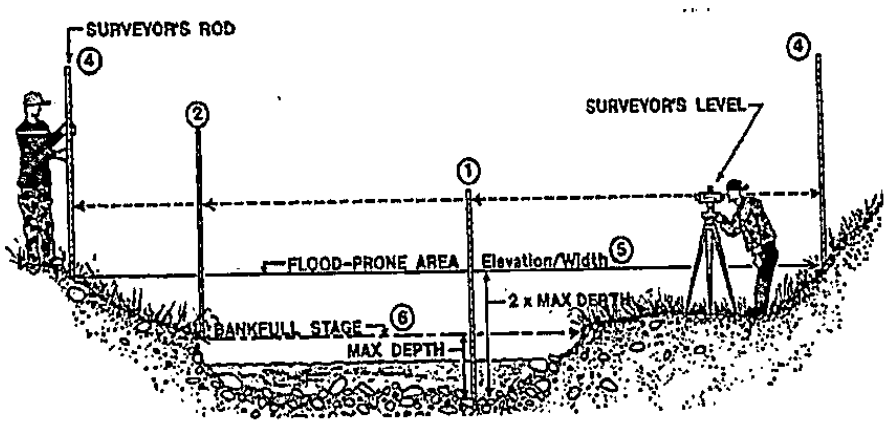
Berikut ini adalah skema langkah-langkah yang digunakan dalam menentukan morfologi sungai menentukan morfologi sungai menurut teori Dave Rosgen :



Dalam menentukan morfologi sungai, maka harus diketahui beberapa faktor yang menjadi ciri khas pada sungai tersebut. Data yang diperlukan adalah lebar aliran (W_{bkf}), kedalaman aliran (d_{bkf}), lebar aliran banjir (W_{fpa}), kedalaman maksimum aliran (d_{mbkf}), *sinousitas* (belokan sungai), kemiringan aliran *(slope),* dan material dasar sungai (d_{50}).

a. *Entrenchment Ratio*

Entrenchment Ratio adalah rasio hubungan antara lebar aliran banjir (W_{fpa}) terhadap lebar aliran sungai (W_{bkf}). Untuk studi saat ini tidak menggunakan alat *waterpass,* namun hanya digunakan alat meteran untuk melakukan pengukuran.



Gambar 3. 2 Cara pengukuran *Entrenchment Ratio* (Rosgen 1996).

Cara perhitungan dalam menentukan *Entrenchment Ratio* adalah sebagai berikut:

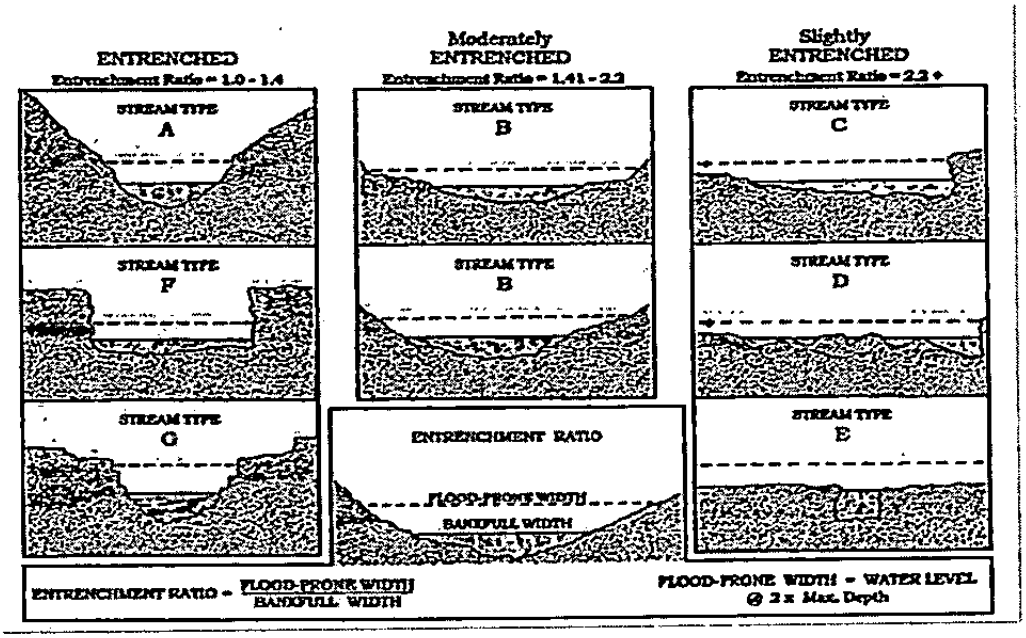
$$Entrenchment\ Ratio = \frac{Lebar\ aliran\ banjir(W_{fpa})}{Lebar\ aliran\ sungai(W_{bkt})} \qquad (3.1)$$

Keterangan :

W_{fpa} = lebar aliran banjir *(flood – prone area width).*

W_{bkt} = lebar aliran sungai *(bankfull surface width).*

1. Aliran berparit besar 1–1,4 mewakili tipe sungai A. F dan G.
2. Aliran berparit tengah antara 1,4–2,2 mewakili tipe sungai B.
3. Aliran berparit sekitar 2,2 ke atas mewakili tipe sungai C, D, dan E.



Gambar 3. 3 *Entrenchment Ratio* mewakili tipe sungai (Rosgen, 1996).

b. *Width/Depth Ratio (W/D Ratio)*

Width/Depth Ratio adalah rasio hubungan antara lebar antara sungai (W_{bkf}) terhadap kedalaman sungai (d_{bkf}). Adapun rumus yang digunakan adalah :

$$Width / Depth\ Ratio = \frac{Lebar\ aliran\ sungai\left(W_{bkf}\right)}{Kedalaman\ aliran\ sungai\left(d_{bkf}\right)} \qquad (3.2)$$

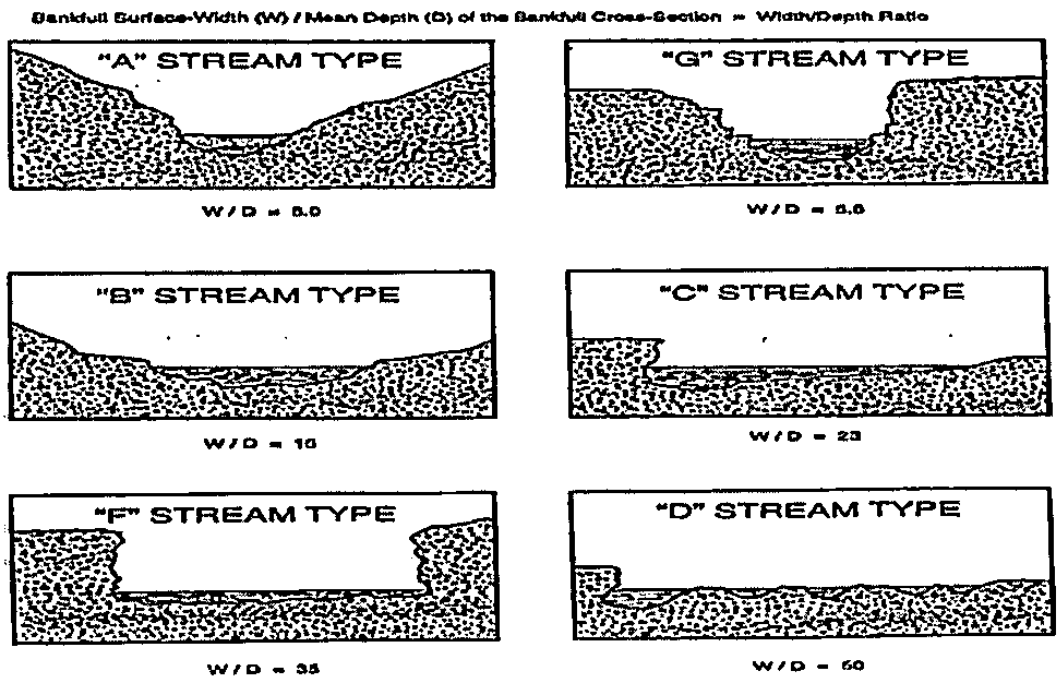
Keterangan :

W_{bkf} = lebar aliran sungai (*bankfull surface width*).

$_{bkf}$ = kedalaman sungai (*bankfull mean depth*).

c. *Width/Depth* di sungai dibagi dalam 4 kriteria yaitu :

1. Untuk tipe sungai A, E dan G mewakili W/D *ratio* lebih kecil dari 12.
2. Untuk tipe sungai B, C dan F mewakili *W/D ratio* lebih besar dari 12.
3. Untuk tipe sungai DA mewakili *W/D ratio* lebih kecil dari 40.

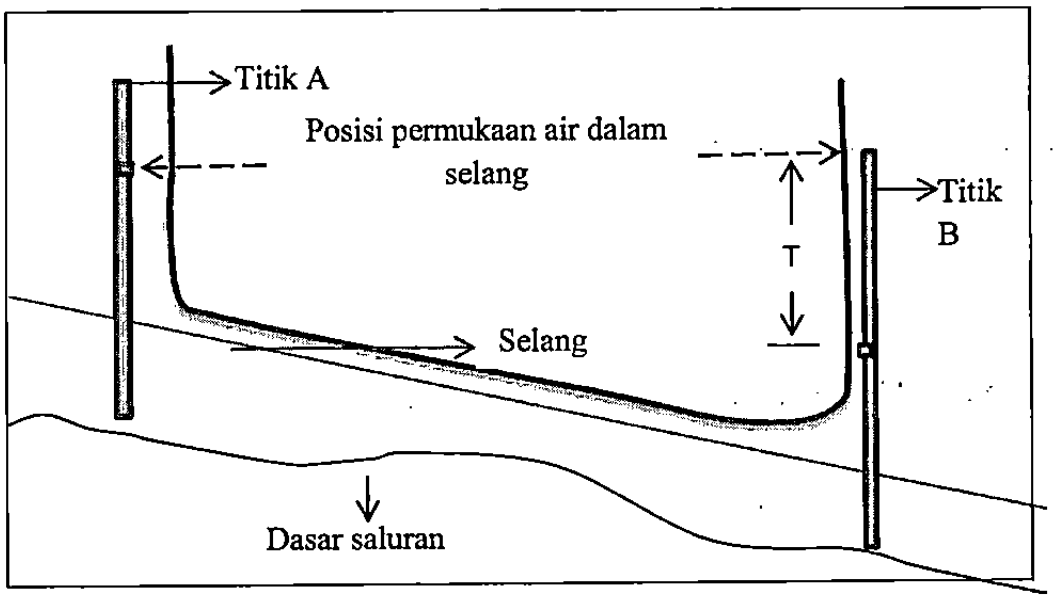


Gambar 3. 4 Contoh *W/D Ratio* mewakili tipe sungai (Rosgen, 1996).

3. Kemiringan Alur Sungai (*slope*)

Kemiringan alur sungai merupakan salah satu faktor utama dalam menentukan tipe sungai. Setelah tipe sungai diketahui maka dapat diketahui morfologi dan hubunganya terhadap sedimentasi, fungsi hidrolik, dan fungsi ekologi. Pengukuran kemiringan sungai menggunakan metode selang, antara lain sebagai berikut :

1. Alat yang digunakan antara lain dua buah tongkat yang sama panjangnya dan diberi tanda sama tingginya, Selang kecil dengan panjang sesuai kebutuhan dan kondisi di lapangan, dan meteran tangan.
2. Ditentukan jarak yang akan diukur kemiringan alur sungainya, Semakin jauh maka semakin baik.
3. Kedua tiang ditempatkan pada titik awal dan titik akhir, tempatkan ujung selang yang telah diisi dengan air pada kedua tiang dan posisi permukaan air pada tiang pertama tepat pada tanda.



Gambar 3.7 Pengukuran *Slope* menggunakan Selang.

4. Kemiringan alur sungai menurut Rosgen (1996), bentuk sungai secara memanjang dibedakan menjadi tujuh tipe yaitu, tipe A, B, C, D, E, F, dan G. Tipe tersebut akibat pengaruh kemiringan memanjang dan bahan penyusun dasar sungai. Berdasarkan kemiringan dominanya, Sungai dapat dibagi menjadi :
   1. Sungai dengan kemiringan dominan diatas 10%, umumnya dimiliki oleh sungai bertipe Aa+.
   2. Sungai dengan kemiringan dominan antara 4% sampai dengan 10%, umumnya dimiliki oleh sungai bertipe A.
   3. Sungai dengan kemiringan dominan antara 2% sampai dengan 4%, umumnya dimiliki oleh sungai bertipe B dan G.
   4. Sungai dengan kemiringan dominan lebih kecil dari 2% umumnya dimiliki oleh sungai bertipe C, E dan F.
   5. Sungai dengan kemiringan dominan lebih kecil dari 4% umumnya dimiliki oleh sungai bertipe D.
   6. Sungai dengan kemiringan dominan lebih kecil dari 0,5% umumnya dimiliki oleh sungai bertipe DA.

$$Kemiringan\,sungai = \frac{elevasi\,atas - elevasi\,bawah}{panjang} \times 100\% \qquad (3.3)$$

Keterangan :

Elevasi bawah = elevasi di titik bawah yang diamati.

Elevasi atas = elevasi di titik atas yang diamati.

Panjang = jarak antara 2 titik yang diamati.

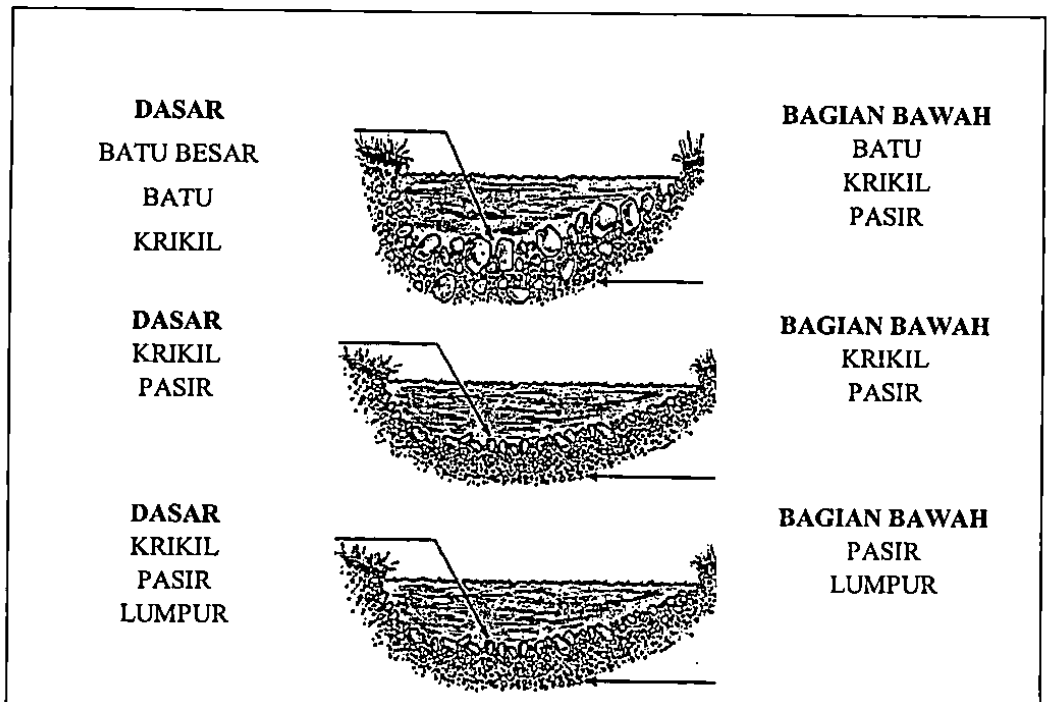
d. Material Dasar Sungai

Pengamatan dan pengambilan material dasar sungai digunakan untuk mengetahui bahan penyusun dasar sungai, untuk mengetahui ukuran material dasar sungai dilakukan pengambilan sampel dan pengujian distribusi ukuran butiran menggunakan ayakan. Adapun beberapa ukuran partikel dasar sungai yaitu:

Tabel 3.1 Ukuran partikel penyusun dasar sungai (Winditiatama, 2011).

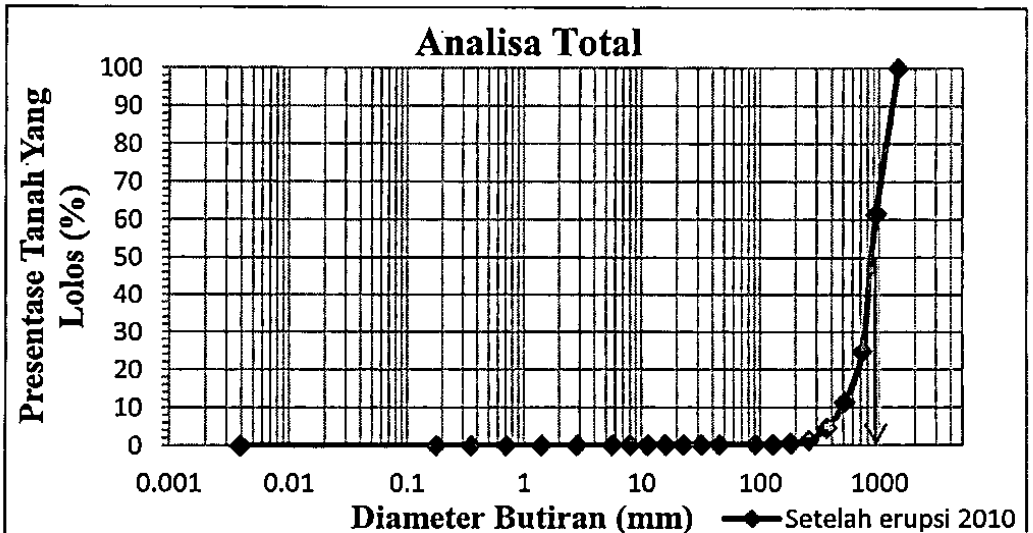
a Partikel	Ukuran	Sedimen
Boulder/Bongkah	>256 mm	Gravel
Cobble/Kerakal	64 – 256 mm	Gravel
Pebble/Kerikil	2 – 64 mm	Gravel
Sand/Pasir	1/16 – 2mm	Sand
Silt/Lanau	1/256 – 1/16 mm	Silt
Clay/Lempung	<1/256 mm	Clay

Untuk menentukan material dasar sungai maka diambil material yang paling dominan. Ukuran partikel dominan merupakan jumlah yang terbesar dari ukuran partikel yang diamati. Selain itu, dapat juga ditentukan dengan d_{50}. d_{50} adalah 50% dari populasi sampel yang diamati sehingga mewakili diameter sampel yang diamati yang



Ukuran partikel umum	Indek ukuran patikel
Batu besar = besar 20 inchi Kecil 10-20 inchi Batu = 2,5-10 inchi Kerikil = 0,8-2,5 inchi Pasir = 0,65-2,0 mm	D 84 = 60 mm berarti bahwa 84% dari partikel diukur dengan jumlah kerikilnya memiliki diameter yang berarti sama dengan atau lebih kecil dari 60 mm

Gambar 3.8 Material penyusun dasar sungai (Rosgen, 1996).

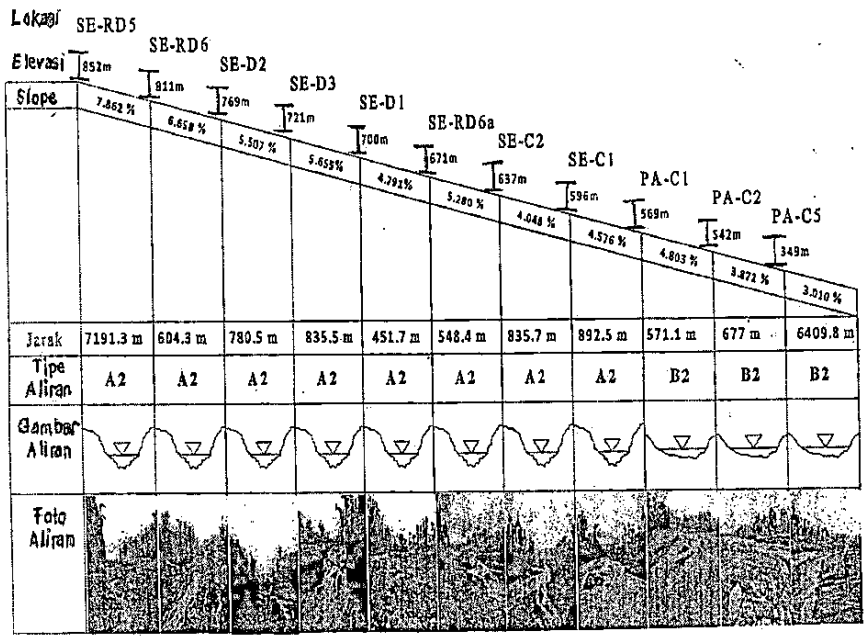


Gambar 3.9 d_{50} pada grafik distribusi ukuran butiran (Lujeng, 2011)

Hasil perhitungan morfologi sungai kemudian disajikan dalam Tabel 3.2 dan Gambar 3.9.

Tabel 3.2 Hasil perhitungan morfologi sungai (Winditiatama, 2011).

No.	Nama	Slope				Enterenchment Ratio			W/D Ratio			D-50	Tipe Morfologi sungai
		Elevasi Awal (m)	Elevasi Akhir (m)	Jarak (m)	Kemiringan (%)	Lebar Banjir (m)	Lebar Aliran (m)	Entranchment Ratio	Lebar Aliran (m)	Kedalaman Aliran (m)	W/D Ratio	Material	
1	SE-RD5	2905	852.2208	7191.274114	7.862	32.10	6.30	5.10	6.30	0.35	18.00	batu besar	A2
2	SE-RD6	852.2208	811.9872	604.2877471	6.658	30.00	3.10	9.68	3.10	0.35	8.86	batu besar	A2
3	SE-D2	811.9872	769.0104	780.4543737	5.507	22.00	11.50	1.91	11.50	0.40	28.75	batu besar	A2
4	SE-D3	769.0104	721.7664	835.5100949	5.655	30.00	5.00	6.00	5.00	0.38	13.16	batu besar	A2
5	SE-D1	721.7664	700.1256	451.7195091	4.791	25.00	4.00	6.25	4.00	0.33	12.12	batu besar	A2
6	SE-RD6a	700.1256	671.1696	548.3592558	5.280	25.20	7.60	3.32	7.60	0.23	33.04	batu besar	A2
7	SE-C2	671.1696	637.3368	835.6906455	4.048	40.00	3.50	11.43	3.50	0.35	10.00	batu besar	A2
8	SE-C1	637.3368	596.4936	892.541304	4.576	25.00	10.30	2.43	10.30	0.25	41.20	batu besar	A2
9	PA-C1	596.4936	569.0616	571.1365188	4.803	20.00	10.00	2.00	10.00	0.50	20.00	batu besar	A2
10	PA-C2	569.0616	542.8488	676.9572314	3.872	90.00	8.00	11.25	8.00	0.45	17.78	batu besar	B2
11	PA-C5	542.8488	349.9104	6409.775872	3.010	20.00	10.00	2.00	10.00	0.50	20.00	batu besar	B2



Gambar 3.9 Hasil perhitungan morfologi sungai (Winditiatama, 2011).

B. Hidrometri

Hidrometri adalah cabang ilmu (kegiatan) pengukuran air, atau pengumpulan data dasar bagi analisis hidrologi (Harto, 1993). Dalam pengertian sehari-hari, kegiatan hidrometri pada sungai diartikan sebagai kegiatan untuk mengumpulkan data mengenai sungai, baik yang menyangkut tentang ketinggian muka air maupun debit sungai serta sedimentasi atau unsur aliran lain. Beberapa macam pengukuran yang dilakukan dalam kegiatan hidrometri adalah sebagai berikut:

1. Kecepatan aliran

Kecepatan aliran merupakan komponen aliran yang sangat penting. Hal ini disebabkan oleh pengukuran debit secara langsung pada suatu penampang sungai tidak dapat dilakukan (paling tidak dengan cara kovensional). Kecepatan ini diukur dalam dimensi satuan panjang setiap satuan waktu, umumnya dinyatakan dalam meter/detik (m/d). Pengukuran Kecepatan aliran dapat dilakukan dengan berbagai cara salah satunya adalah pengukuran dengan pelampung (*float*). Pelampung digunakan sebagai alat pengukur kecepatan aliran apabila diperlukan kecepatan aliran dengan tingkat ketelitian yang relatif kecil. Pengukuran dilakukan dengan cara:

a. Sebuah titik (tiang, pohon atau tanda lain) ditetapkan di salah satu sisi sungai, dan satu titik disisi lain sungai, Sehingga kalau ditarik garis semu antara dua titik tersebut, maka garis akan tegak lurus searah aliran sungai.
b. Ditetapkan jarak (L) tertentu, misalnya 5 m, 10 m, 20 m, atau 50 m (tergantung kebutuhan dan keadaan) antara kedua titik tersebut, semakin besar kecepatan, sebaiknya jarak semakin panjang.
c. Memanfaatkan sembarang benda yang dapat mengapung apabila pelampung khusus tidak tersedia.
d. Pelampung tersebut dilemparkan beberapa meter di sebelah hulu garis pertama (titik mulai) dan gerakannya diikuti

tersebut melewati garis pertama (di sebelah hulu), Maka tombol *stopwatch* ditekan, dan pelampung tersebut diikuti terus, ketika pelampung sampai di titik kedua (titik selesai) maka *stopwatch* kembali ditekan. Dengan demikian, maka waktu (t) yang diperlukan aliran untuk menghanyutkan pelampung dapat diketahui.

e. Kecepatan aliran (v) dapat dihitung dengan:

$$v = \frac{L}{t}(m/d) \tag{3.4}$$

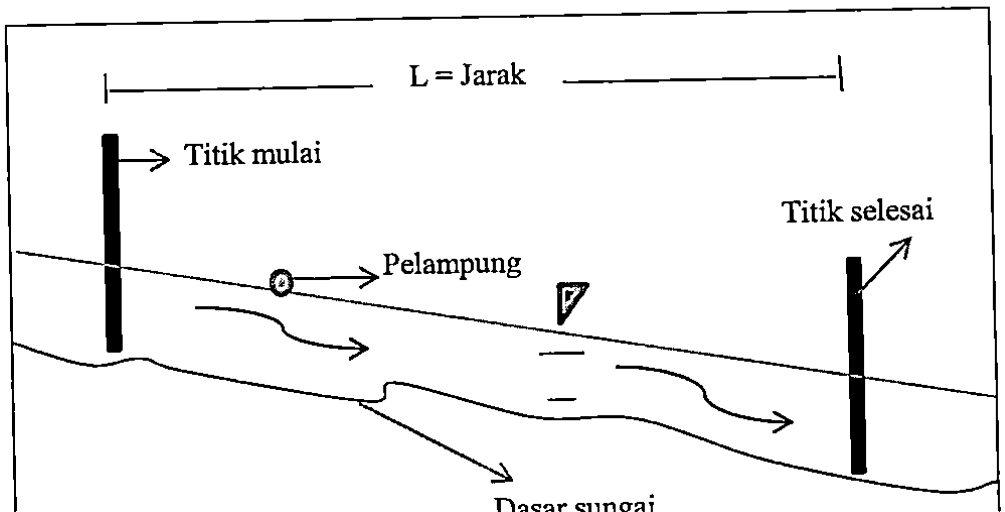
Keterangan :

L = jarak

t = waktu

f. Perlu diketahui disini bahwa kecepatan yang diperoleh adalah kecepatan permukaan sungai, bukan kecepatan rata-rata penampang sungai tersebut. Untuk mendapatkan kecepatan rata-rata penampang sungai, masih harus dikalikan dengan faktor koreksi C. Besar C ini berkisar antara 0,85-0,95 (Harto, 1993).

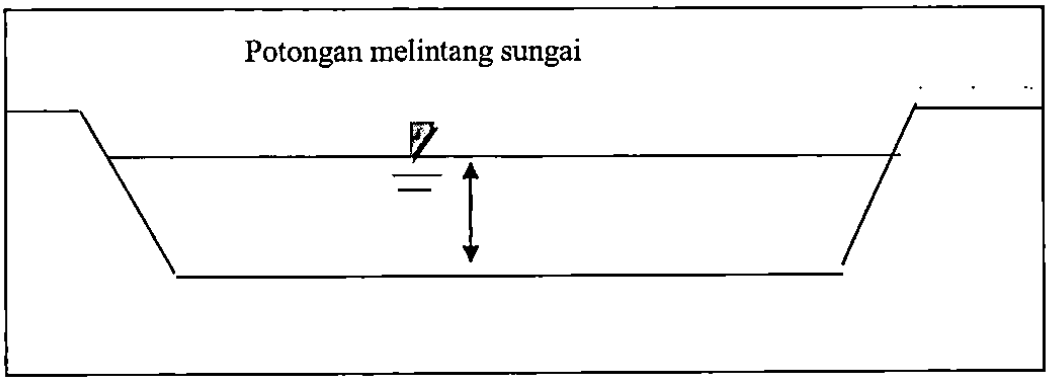
g. Hal lain yang perlu diperhatikan bahwa pengukuran cara ini tidak boleh dilakukan sekali, karena distribusi kecepatan aliran permukaan tidak merata. Oleh sebab itu, dianjurkan paling tidak dilakukan tiga kali percobaan, yaitu sepertiga kiri sungai, Bagian tengah, Sepertiga kanan sungai. Hasil yang diperoleh kemudian dirata-rata.



Gambar 3.10 Metode pengukuran kecepatan aliran dengan pelampung (*float*).

2. Pengukuran tinggi muka air

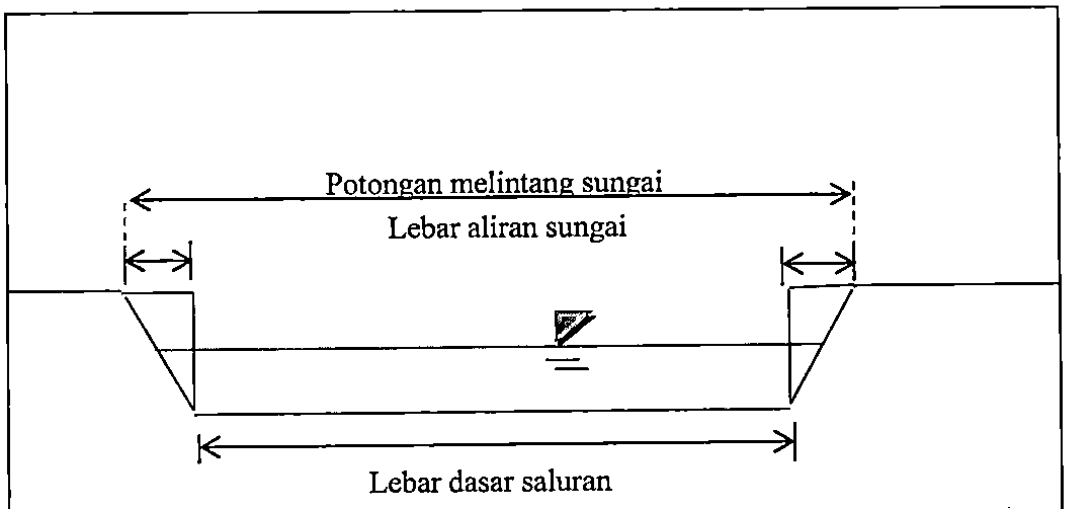
Pengukuran luas penampang memerlukan tinggi muka air, pengukuran tinggi muka air dapat dilakukan dengan bermacam-macam alat tergantung dari kondisi aliran sungai yang akan diukur, salah satunya tongkat/papan duga yang sisinya terdapat rambu ukur.



Gambar 3.11 Tinggi muka air.

3. Pengukuran lebar aliran

Pengukuran lebar aliran juga digunakan untuk mengetahui lebar dasar saluran yang nantinya digunakan mendapatkan luas penampang. Pengukuran lebar aliran dilaksanakan menggunakan alat ukur lebar. Pengukuran lebar aliran menggunakan meteran.



Gambar 3.12 Lebar aliran sungai.

4. Pengukuran debit

Debit (*discharge*), atau besarnya aliran sungai (*stream flow*) adalah volume aliran yang mengalir melalui suatu penampang melintang sungai per satuan waktu. Biasanya debit dinyatakan dalam satuan m^3/d atau liter/detik. Aliran adalah pergerakan air di dalam alur sungai. Pada dasarnya pengukuran debit adalah pengukuran luas penampang, kecepatan aliran, dan tinggi muka air. Rumus yang umumnya digunakan adalah:

$$Q = A.v \tag{3.5}$$

Keterangan:

Q = debit (m^3/d).

A = luas penampang (m^2).

v = kecepatan aliran rata-rata(m/d).

Nilai A (luas penampang aliran di asumsikan berbentuk trapesium kerena faktor keamanan pada saat penelitian) diperoleh menggunakan persamaan:

$$A = h\,(b + m \times h) \tag{3.6}$$

Keterangan:

A = luas penampang basah.

h = kedalaman aliran.

b = lebar dasar aliran.

m = kemiringan tebing (vertikal : horizontal).

Dengan demikian pengukuran debit adalah pengukuran dan perhitungan kecepatan aliran, lebar aliran dan pengukuran tinggi muka air yang akan digunakan untuk perhitungan luas penampang.

5. Angkutan sedimen (*transport sediment*)

Angkutan sedimen atau *transport sediment* merupakan suatu peristiwa terangkutnya material oleh aliran sungai. Sungai-sungai membawa sedimen dalam setiap aliranya. Bentuk, ukuran dan beratnya partikel material tersebut

rumus-rumus untuk menghitung besarnya angkutan sedimen salah satunya dengan menggunakan rumus Formula Einstein (1950) dalam (Kironoto, 1997). Einstein menetapkan persamaan muatan dasar sebagai persamaan yang menghubungkan material dasar dengan pengaliran setempat (*local flow*). Persamaan itu menggambarkan keadaan seimbang dari pada pertukaran butiran dasar antara lapisan dasar (*bed layer*) dan dasarnya. Einstein menggunakan d_{35} sebagai parameter angkutan, sedangkan untuk kekasaran digunakan d_{65}.

1. Dalam menentukan besarnya angkutan sedimen harus terlebih dahulu diketahui:
   a. Debit aliran (Q).
   b. Lebar saluran/sungai (b).
   c. Kemiringan dasar (S).
   d. Gradasi ukuran butir dari hasil analisis saringan.

Tabel 3.3 Contoh gradasi ukuran butir (Kironoto, 1997).

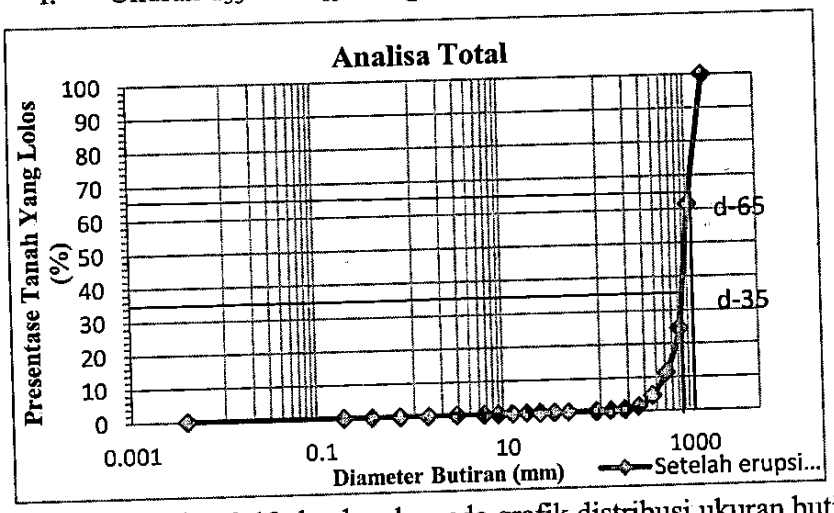
Interval ukuran butiran (mm)	Ukuran butiran rata-rata (mm)	% material
0,062 - 0,125	0,0935	40%
0,125 - 0,250	0,1875	45%
0,250 - 0,500	0,3750	15%

e. Viskositas air/kekentalan air (μ). Nilai (μ) ditentukan dari Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Nilai *viskositas* air/kekentalan air.

Temperatur (^0C)	Viskositas ($N\,s/m^2$) $\times 10^{-3}$
0	$1{,}79 \times 10^{-3}$
5	$1{,}51 \times 10^{-3}$
10	$1{,}31 \times 10^{-3}$
15	$1{,}41 \times 10^{-3}$
20	$1{,}00 \times 10^{-3}$
25	$8{,}91 \times 10^{-4}$
30	$7{,}96 \times 10^{-4}$
35	$7{,}20 \times 10^{-4}$
40	$6{,}53 \times 10^{-4}$
50	$5{,}47 \times 10^{-4}$
60	$4{,}66 \times 10^{-4}$
70	$4{,}40 \times 10^{-4}$
80	$3{,}34 \times 10^{-4}$
90	$3{,}15 \times 10^{-4}$
100	$2{,}82 \times 10^{-4}$

f. Ukuran d_{35} dan d_{65} dari grafik distribusi ukuran butir.



Gambar 3.13 d_{35} dan d_{65} pada grafik distribusi ukuran butir (Lujeng, 2011).

2. Menentukan nilai jari-jari hidraulik *Rb'*

Untuk dapat menghitung angkutan sedimen dasar menurut persamaan Einstein, nilai Rb', yaitu jari-jari hidraulik akibat pengaruh kekasaran butir *(grain roughness)*, harus terlebih dahulu ditentukan. Nilai Rb' dapat ditentukan dengan cara coba-coba menurut Einstein-Barbrossa (1952), sedemikian sehingga hasil hitungan debit aliran yang didasarkan pada nilai Rb' nilainya sama dengan debit aliran yang diketahui (Q_{hitung} ≈ debit yang telah diketahui). Kecepatan gesek akibat kekerasan butiran :

a. Kecepatan gesek $u_0' = \sqrt{gRb'S}$ (3.7)

Keterangan:

u_o' = kecepatan gesek akibat kekasaran butiran.

g = percepatan gravitasi.

S = *slope/* kemiringan dasar saluran.

b. Tebal lapisan *sub viscous* $\delta' = \frac{11,6v}{u_0}$ (3.8)

δ'= tebal lapisan *sub viscous.*

μ = *vikositas*/kekentalan air.

u_o' = kecepatan gesek akibat kekasaran butiran.

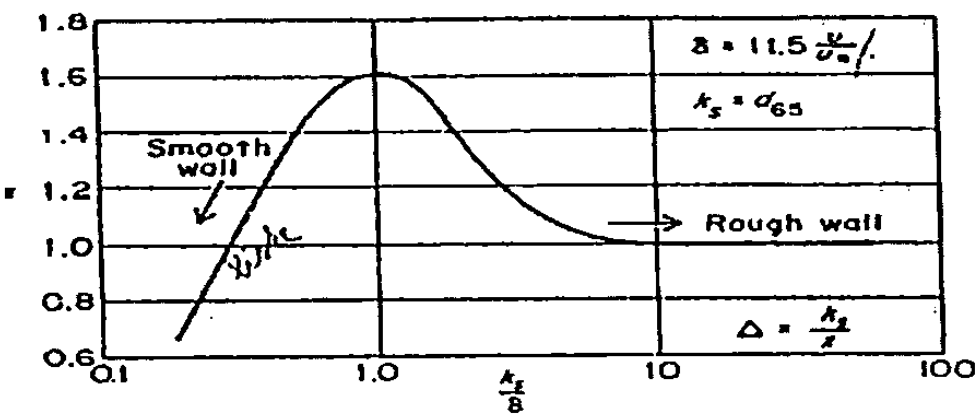
c. $$\frac{k_s}{\delta'} = \frac{d_{65}}{\delta'} \qquad (3.9)$$

Keterangan:

ks = kekasaran butiran.

δ = tebal lapisan *sub viscous*.

x = Dari gambar 3.9 (faktor koreksi pengaruh *vikositas*).



Gambar 3.14 Faktor koreksi dalam persamaan distribusi kecepatan logaritmik (Kironoto, 1997).

d. Kecepatan aliran rata-rata *v*, dapat dihitung dengan persamaan logaritmik berikut :

$$v = 5{,}75u_0' \log(12{,}27\frac{Rb'x}{k_s}) \qquad (3.10)$$

Keterangan:

v = kecepatan aliran rata-rata.

Rb' = jari-jari hidrolik.

Keterangan:

Ψ' = intensitas aliran.

γ_s = berat spesifik air.

γ = berat spesifik sedimen.

d_{35} = parameter angkutan.

Rb = jari-jari hidrolik.

S = *slope*/kemiringan dasar saluran.

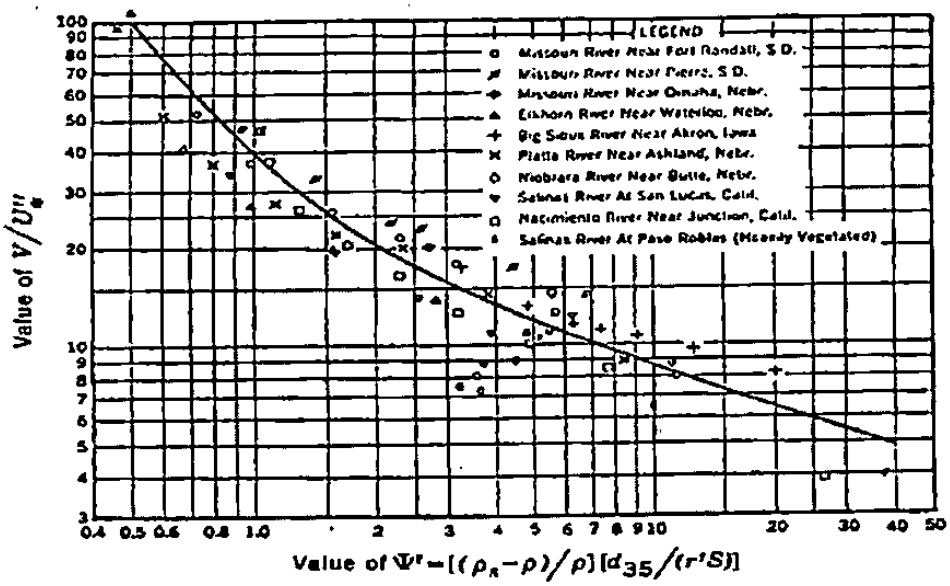
f. Dari gambar 3.10 (Einstein dan Barbrossa, 1952) untuk yang diperoleh:

$$\frac{v}{u_o''} \tag{3.12}$$

Keterangan:

u_o'' = kecepatan gesek akibat konfigurasi dasar.

v = kecepatan aliran rata-rata.



Gambar 3.15 Grafik Einstein dan Barbrossa.

Keterangan:

S = kemiringan dasar.

g = gravitasi.

R'' = jari-jari hidrolik untuk penyimpangan saluran.

u'' = kecepatan gesek akibat konfigurasi dasar.

h. Jari-jari total di peroleh:

$$R_b = R_b' + R_b'' \tag{3.14}$$

Keterangan:

R_b = jari-jari hidrolik total.

R_b' = jari-jari hidrolik rencana/coba-coba.

R_b'' = jari-jari hidrolik akibat pengaruh konfigurasi dasar.

$$R_b = \frac{bh}{b+2h} \tag{3.15}$$

Keterangan:

3. Angkutan sedimen

Setelah nilai R_b' benar maka selanjutnya dapat dilakukan hitungan angkutan sedimen menurut Einstein(1950) sebagai berikut:

a. Menghitung kecepatan gesek menggunakan persamaan 3.7.

b. Menghitung tebal lapisan sub-*viscous* menggunakan persamaan 3.8.

c. $\Delta = \frac{d_{65}}{X}$. (3.17)

d. $\frac{\Delta}{\delta'}$ X= 0,177 x Δ untuk $\frac{\Delta}{\delta'} > 1{,}8$ (3.18)

X= 1.39 x δ untuk $\frac{\Delta}{\delta'} < 1{,}8$

e. Untuk fraksi butiran, d_i= ukuran x10^{-3}

$\frac{d_{i1}}{x}$ (3.19)

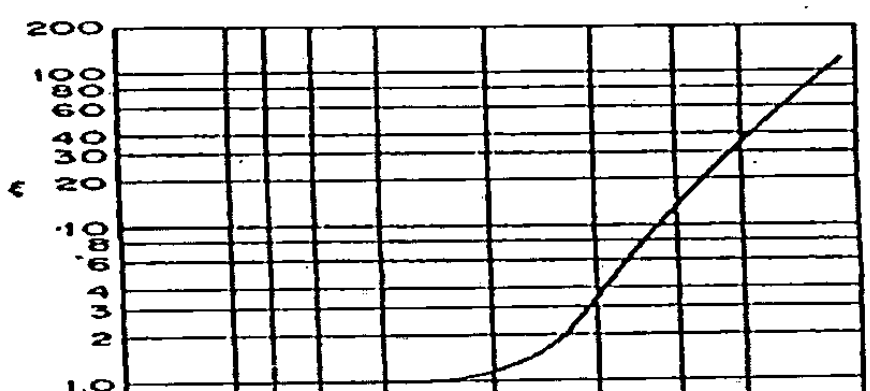
Keterangan:

X = nilai karakteristik ukuran butir tidak seragam.

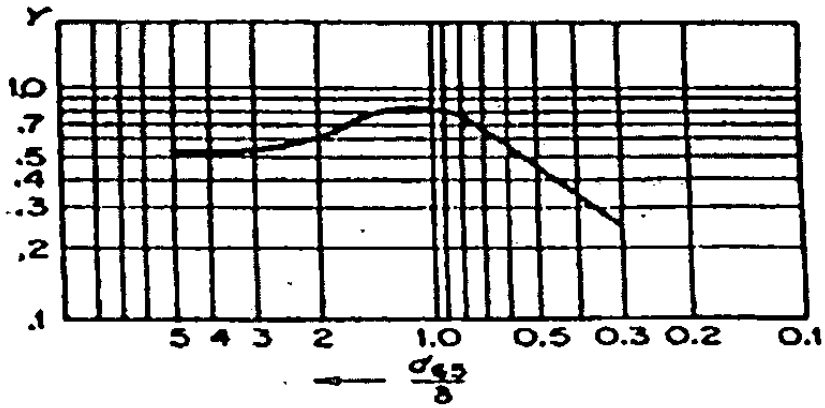
Δ = kekasaran diameter butiran.

Untuk $\frac{di}{X}$ dari Gambar 3.16 diperoleh nilai *hiding factor.*

$\frac{d_{65}}{\delta'}$ dari Gambar 3.17 diperoleh nilai koreksi gaya angkat(Y_l).



Gambar 3.16 Grafik nilai *hiding factor.*



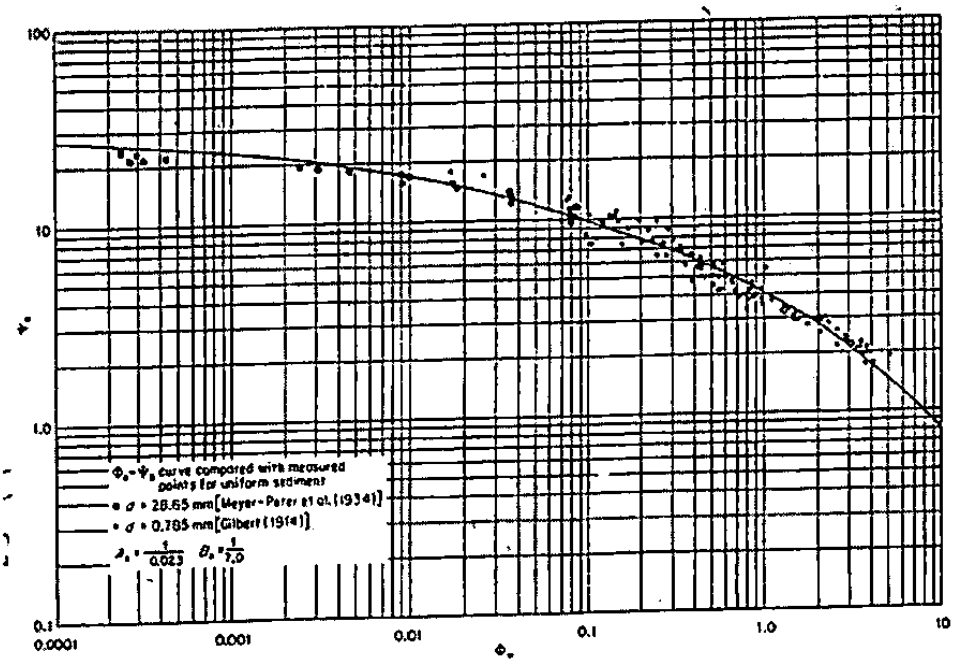
Gambar 3.17 Grafik nilai koreksi gaya angkat (Y_1).

f. $$\left(\frac{\beta}{\beta_x}\right)=\left(\frac{\log(10{,}6)}{\log(10{,}6X/\Delta)}\right) \tag{3.20}$$

g. Intensitas aliran yang telah dikoreksi dapat diperoleh:

$$\psi'_{o1}=\xi_1 Y_1\left(\frac{\beta}{\beta_x}\right)^2 \tag{3.21}$$

Dari Gambar 3.22 untuk nilai Ψ_{o1}', nilai Φ dapat ditentukan berada di luar kurva. Jika nilai Φ berada di luar kurva maka dianggap Φ = 0,0.



Gambar 3.18 Grafik Einstein

h. Selanjutnya besar angkutan sedimen suspensi untuk fraksi butiran ukuran d_1 adalah:

$$(i_b q_b)_1 = i_b \Phi_{o1} \rho_s (gD_1)^{3/2} \left(\frac{\rho - \rho_s}{\rho} \right)^{1/2} \quad (3.22)$$

i. Dengan prinsip yang sama dapat dihitung besar angkutan sedimen dasar untuk fraksi d_2 dan d_3 sebagai berikut :

$$(i_b q_b)_1 = i_b \Phi_{o2} \rho_s (gd_2)^{3/2} \left(\frac{\rho - \rho_s}{\rho} \right)^{1/2} \quad (3.23)$$

$$(i_b q_b)_1 = i_b \Phi_{o3} \rho_s (gd_3)^{3/2} \left(\frac{\rho - \rho_s}{\rho} \right)^{1/2} \quad (3.24)$$

Keterangan:

i_b = fraksi kelas ukuran i dalam material dasar.

q_b = angkutan muatan dasar dalam berat per satuan waktu dan lebar.

g = percepatan gravitasi.

d_i = diameter ukuran butir kelas i.

ρ = density air.

ρ_s = density sedimen.

ϕ = intensitas angkutan.

j. Perhitungan selengkapnya disajikan seperti Tabel 3.5 berikut:

Tabel 3.5. Perhitungan Angkutan Sedimen

	d (mm	i_b (%)	R_b' (m)	Ψ,'	d/x	ξ,	Y	Ψ,i'	θ.	($i_B q_B$) (kg/ms)
1										
2										
3										
								Σ		

k. Jadi besar angkutan sedimen dasar total per hari untuk seluruh fraksi (dan untuk selebar sungai), b adalah:

$$\Sigma\ (i_b\, q_b) \times 60 \times 60 \times 24 \times b \qquad (3.25)$$

Keterangan:

b = lebar dasar aliran sungai.

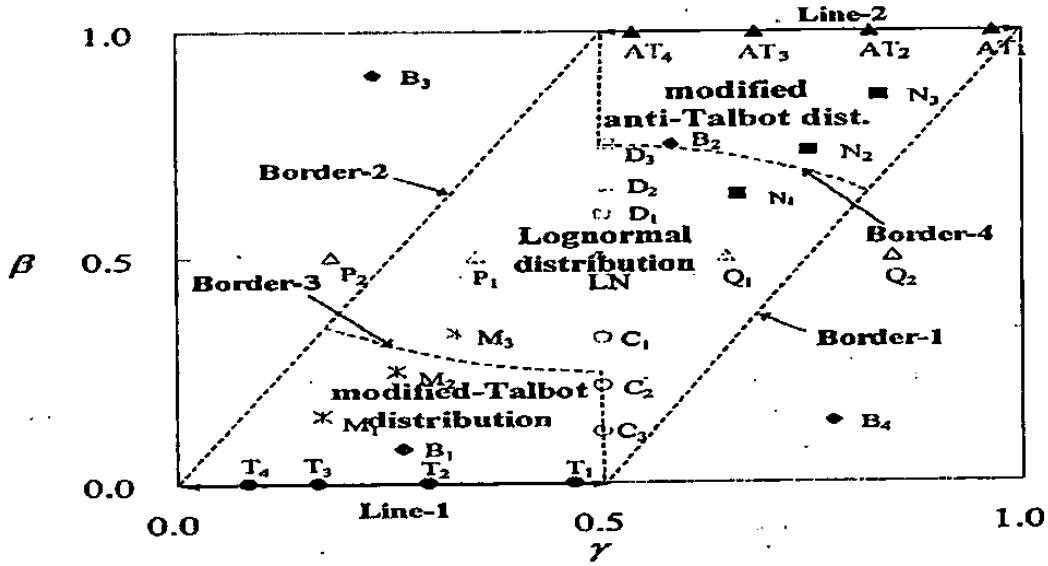
$\Sigma\ (i_B\, q_B)$ = total besar angkutan sedimen.

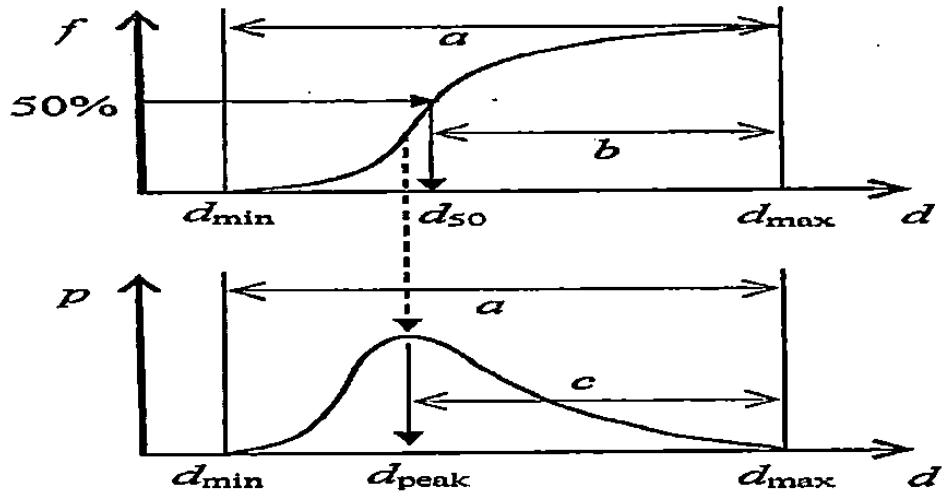
C. Porositas Sedimen

Menurut Sulaiman (2008), untuk menghitung nilai porositas sedimen dasar sungai dilakukan dengan langkah-langkah berikut. Pertama, material dasar di setiap titik yang mewakili bagian atas, tengah dan bawah diayak untuk mendapatkan distribusi ukuran butir. Selanjutnya, jenis distribusi ukuran butir ditentukan berdasarkan nilai parameter γ dan β, yang dihitung dengan persamaan berikut:

$$\gamma = \frac{\log d_{max} - \log d_{50}}{\log d_{max} - \log d_{min}} \quad \text{.....Persamaan 3.26}$$

$$\beta = \frac{\log d_{max} - \log d_{peak}}{\log d_{max} - \log d_{min}} \quad \text{.....Persamaan 3.27}$$





Gambar 3.20 indikasi geometric γ dan β (Sulaiman, 2008)

dengan:

γ dan β = parameter geometrik

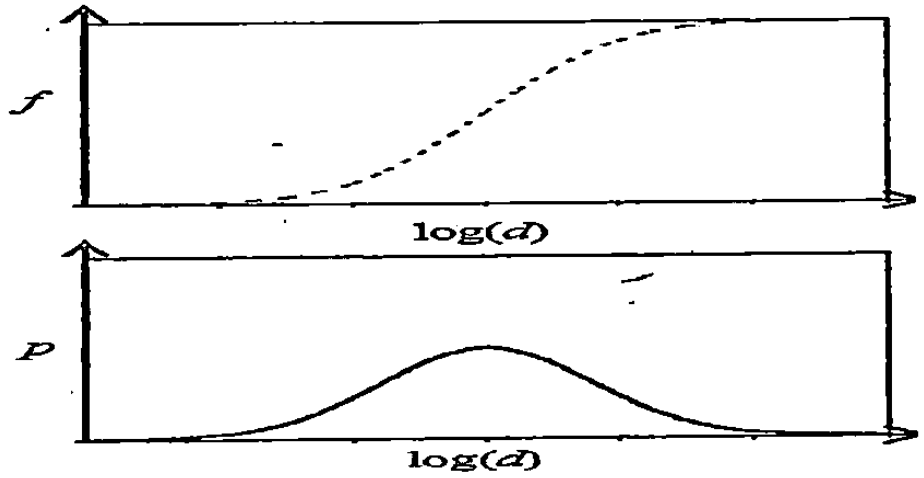
d_{max} = diameter maksimal

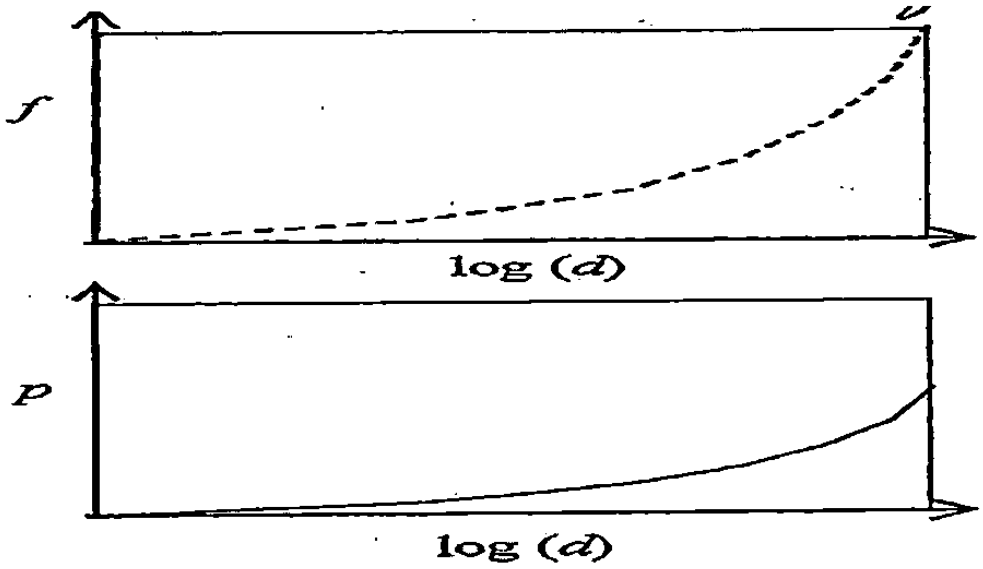
d_{min} = diameter minimal

d_{peak} = ukuran butir puncak

d_{50} = 50 % populasi sampel yang di amati

Setelah nilai-nilai y dan f diketahui, jenis distribusi ukuran butir dapat ditemukan dengan menggunakan diagram diusulkan oleh Sulaiman (2008).





Gambar 3.22 Diagram Tipe Talbot distribusi (Sulaiman, 2008).

Selanjutnya, Nilai porositas dihitung dengan persamaan berikut:

1. Distribusi lognormal

$\sigma_1{}^2 = \sum_{j=1}^{N} (Ind_j - Ind)^2 P_{sj}$.....Persamaan 3. 28

Dengan ketentuan :

$\gamma = (0{,}1561\, jika\ 1 < \sigma)$.....Persamaan 3.28 a

$\gamma = (0{,}0465\sigma) + (0{,}2258\, jika\ 1{,}25 < \sigma < 1{,}5)$ .....Persamaan 3.28 b

$\gamma = (-0{,}141\sigma) + (0{,}3445\, jika\ 1 < \sigma < 1{,}25)$.....Persamaan 3.28 c

$\gamma = (-0{,}105\sigma) + (0{,}3088\, jika\ 0{,}75 < \sigma < 1{,}0)$.....Persamaan 3.28 d

$\gamma = (-0{,}1871\sigma) + (0{,}3698\, jika\ 0{,}5 < \sigma < 0{,}75)$.....Persamaan 3.28 e

dengan:

σ = standar deviasi

d = diameter butir

j = kelas ukuran butir

psj = proporsi kelas j

γ = porositas

Tipe distribusi ukuran butir log normal adalah yang sering terjadi pada kondisi sungai yang masih alamiah. Dan material dasar sungai umumnya

2. Distribusi tallbot

$$n_T(x\%) = \frac{In(f(D_{x\%}))}{In\left(\frac{\log D_{x\%} - \log D_{\min}}{\log D_{\max} - \log D_{\min}}\right)}$$ .....Persamaan 3.29

$$n_T = \frac{n_T(16\%) + n_T(25\%) + (50\%) + n_T(75\%) + n_T(85\%)}{5}$$ ...Persamaan 3.29 a

Dengan ketentuan:

$100 < d_{maks}/d_{min} = \gamma = 0{,}0125\ n_T + 0{,}3$.....Persamaan 3.29 b

$100 \leq d_{maks}/d_{min} = \gamma = 0{,}0125\ n_T + 0{,}3$.....Persamaan 3.29 c

$d_{maks}/d_{min}\ 1000 \geq = \gamma = 0{,}0125\ n_T + 0{,}15$ .....Persamaan 3.29 d

Dengan:

$f(d)$ = persen komulatif butiran halus

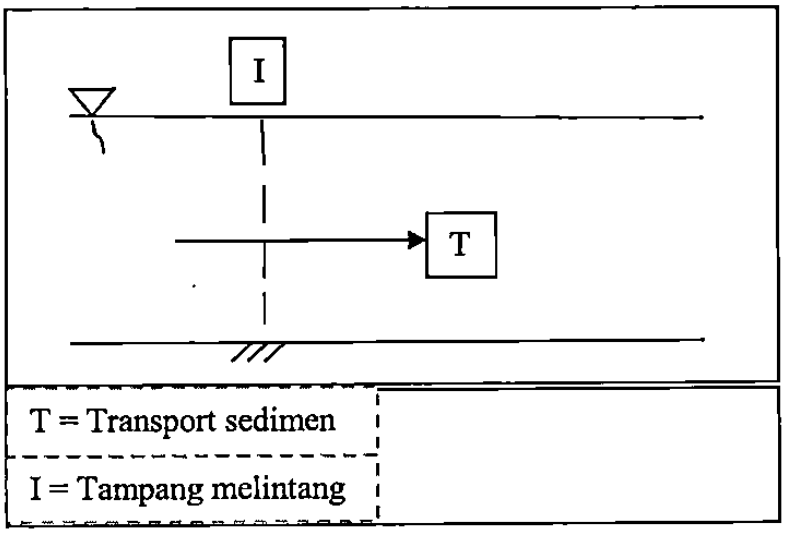
n_T = angka Talbot

Tipe distribusi M Talbot sering terjadi di sungai vulkanik di mana material dasar sungai umumnya didominasi oleh material kasar.

D. Transport Sedimen

Angkutan sedimen atau *transport sediment* merupakan suatu peristiwa terangkutnya material oleh aliran sungai. Sungai-sungai membawa sedimen dalam setiap aliranya. Bentuk, ukuran dan beratnya partikel material tersebut akan menentukan jumlah besaran angkutan sedimen. Angkutan sedimen dalam penelitian ini adalah angkutan sedimen dasar (*bed load*) dan diperoleh dengan menggunakan persamaan Einstein (1950).

Menurut Kironoto, (1997) banyaknya transport sedimen (T) dapat dikarenakan dari perpindahan tempat netral sedimen yang melalui suatu tampang melintang selama periode waktu tertentu. Pengetahuan transport sedimen untuk



Gambar 3.23 Transport sedimen

Metode pendekatan yang digunakan untuk mengetahui angkutan sedimen dasar sungai adalah dengan metode Einstein didasarkan pada beberapa konsep yang ditunjang oleh hasil pengamatan laboratorium (eksperimental). Metode pendekatan Einstein didasarkan pada dua konsep dasar, sebagai berikut:

1. Konsep kondisi kritis ditiadakan, karena kondisi kritik untuk awal gerak sedimen sangat sulit untuk didefinisikan.
2. Angkutan sedimen dasar lebih dipengaruhi olek fluktuasi aliran yang terjadi dari pada oleh nilai rata-rata gaya aliran yang bekerja pada partikel sedimen. Dengan demikian, bergerak atau berhentinya suatu partikel sedimen lebih tepat dinyatakan dengan konsep probabilitas, yang menghubungkan gaya angkat hidrodinamik sesaat dengan berat partikel didalam air.

Viskositas merupakan ukuran ketahanan sebuah cairan terhadap deformasi atau perubahan bentuk. Viskositas dipengaruhi oleh temperatur, Tekanan, Kohesi dan laju perpindahan momentum molekularnya. Viskositas zat cair cenderung menurun dengan seiring bertambahnya kenaikan temperatur, Hal ini disebabkan gaya – gaya kohesi pada zat cair bila dipanaskan akan mengalami penurunan dengan semakin bertambahnya temperatur pada zat cair yang menyebabkan berturutnya viskositas dari zat cair tersebut. pengaruh viskositas terhadap

Tabel 3.6 Pengaruh viskositas terhadap temperatur

Temperatur (°C)	Viskositas ($\times 10^{-3}$ N.s/m^2)
0	$1,79 \times 10^{-3}$
5	$1,51 \times 10^{-3}$
10	$1,31 \times 10^{-3}$
15	$1,14 \times 10^{-3}$
20	$1,00 \times 10^{-3}$
25	$8,91 \times 10^{-4}$
30	$7,96 \times 10^{-4}$
35	$7,20 \times 10^{-4}$
40	$6,53 \times 10^{-4}$
50	$5,47 \times 10^{-4}$
60	$4,66 \times 10^{-4}$
70	$4,04 \times 10^{-4}$
80	$3,54 \times 10^{-4}$
90	$3,15 \times 10^{-4}$
100	$2,82 \times 10^{-4}$

Langkah Untuk dapat menghitung angkutan sedimen dasar perlu menentukan ukuran butiran d_{35} dan d_{65}, mengetahui gradasi ukuran butiran hasil analisis saringan pada Tabel 3.7 dibawah ini.

Tabel 3.7 Contoh gradasi ukuran butiran hasil analisis saringan

Interval ukuran butiran (mm)	Ukuran butiran rata-rata (mm)	% Material
19,1-4,75	11,517	18% = 0,18
2,35-0,425	1,138	58% = 0,58
0,3-0,075	0,1755	24% = 0,24

Sumber: Hasil Analisis Penelitian (2012)

Kemudian angkutan sedimen dasar dapat dihitung menurut persamaan 3.30 dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

1. Kecepatan gesek akibat kekasaran butiran

$$u_* = \sqrt{g.Rb'.S} \quad \text{.....Persamaan 3.30}$$

dengan:

u_* = kecepatan gesek akibat kekasaran butiran

g = gravitasi

R_b' = jari-jari hidraulik akibat pengaruh kekasaran butiran (*grain roughness*)

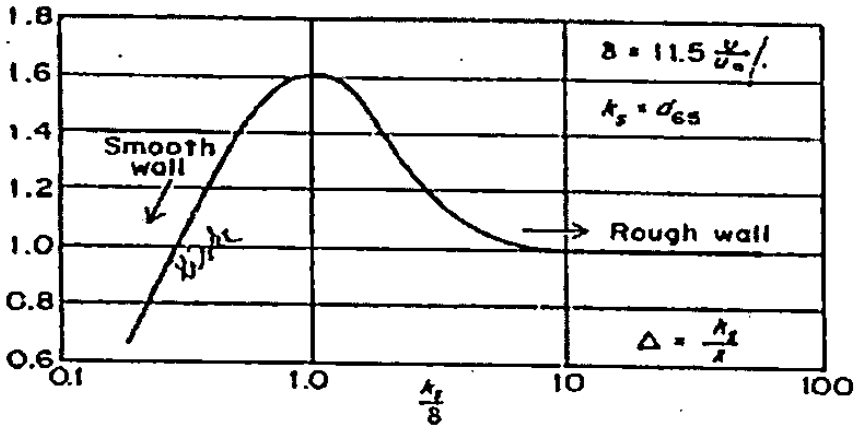
S = kemiringan dasar saluran

2. Tebal lapisan kekentalan(*sub-viscous*)

$$\delta' = \frac{11,6\,\upsilon}{u_*} \quad \text{Persamaan 3.31}$$

$\frac{ks}{\delta'} = \frac{d65}{\delta'}$ .....Persamaan 3.31 a

Untuk $\frac{ks}{\delta'}$ dari Gambar 3.17, diperoleh nilai x



Gambar 3.24 Faktor koreksi dalam persamaan distribusi kecepatan logaritmik.

$\Delta = \frac{d65}{\delta'}$ .....Persamaan 3.31 b

$\frac{\Delta}{\delta'} = (...) < atau > 1,8 \rightarrow x$ .....Persamaan 3.31 c

dengan:

δ' = tebal lapisan sub-viscous

ν = viskositas

u_r = kecepatan gesek akibat kekasaran butiran

k_s = diameter butiran

Δ = kekasaran dasar saluran

X = karakteristik ukuran butiran tidak seragam,

Dengan:

$X = 0,77\ \Delta$ untuk $\Delta / \delta' > 1,8$

$X = 1,39\ \delta'$ untuk $\Delta / \delta' < 1,8$

3. Kecepatan aliran rata-rata, dihitung dengan persamaan logaritmik, untuk menentukan nilai x di peroleh dari Gambar 3.24:

$V = 5,75\ u_r \log(12,27^{Rb'.x})$ Persamaan 3.32

k_s = diameter butiran

4. Intensitas aliran

$$\Psi = \frac{\gamma s - \gamma}{\gamma} \frac{d35}{S.Rb'} = 1{,}65 \frac{d35}{S.Rb'}) \quad \text{.....Persamaan 3.33}$$

dengan:

Ψ = intensitas aliran

d = diameter butiran

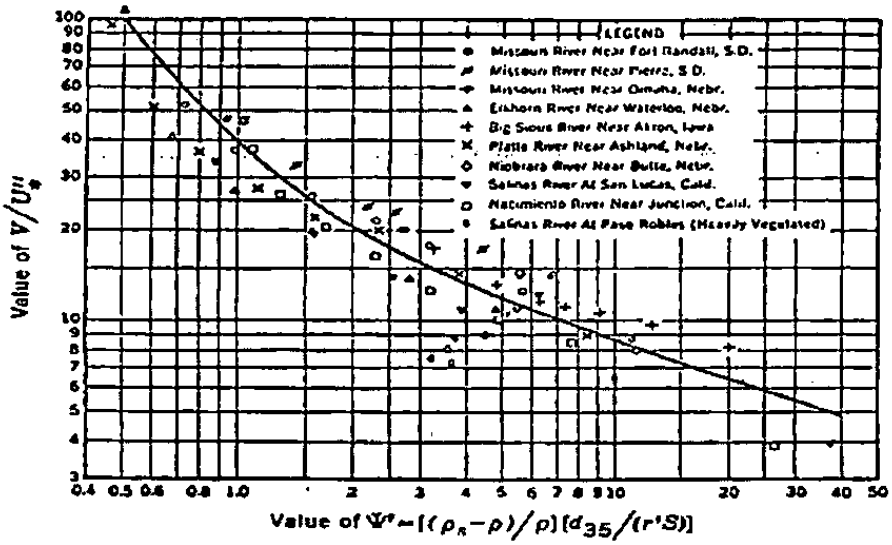
S = kemiringan dasar saluran

Rb' = jari-jari hidraulik akibat pengaruh kekasaran butiran

γs = berat spesifik air

γ = berat spesifik sedimen

Untuk ψ diperoleh berdasarkan Gambar 3.18 (Enstein dan Barbosa,1952) diperoleh nilai $\frac{V}{U'}$:



Gambar 3.25 Grafik Einstein dan Barbarossa(1952)

$$\frac{V}{U'} = \rightarrow U' \text{ ..... Persamaan 3.34}$$

dengan:

U' = kecepatan gesek akibat konfigurasi dasar

V = kecepatan aliran rata-rata

5. Jari-jari hidraulik akibat konfigurasi dasar

$$Rb' = \frac{(U')^2}{\quad} \qquad \text{Persamaan 3.35}$$

Jari-jari hidraulik total diperoleh:

$Rb = Rb' + Rb''$ .....Persamaan 3.35 a

$Rb = \frac{Bh}{B+2h} \rightarrow h$ .....Persamaan 3.35 b

dengan:

Rb" = jari-jari hidraulik akibat konfigurasi dasar

U' = kecepatan gesek akibat konfigurasi dasar

g = gravitasi

S = kemiringan dasar saluran

6. Kontrol hitungan debit

$Q = AV = (B\ h\ \ U')$ .....Persamaan 3.36

dengan:

Q = debit

A = lebar saluran sungai

V = kecepatan

B = lebar saluran sungai

h = tinggi jari-jari hidraulik terhadab aliran

U' = kecepatan gesek akibat konfigurasi dasar

Dengan berdasarkan nilai Rb' yang benar, selanjutnya dapat dilakukan hitungan angkutan sedimen menurut Einstein dalam (*t/hours*) adalah sebagai berikut:

$\Psi_{,}' = \frac{\gamma s - \gamma}{\gamma} = \frac{d}{S.Rb'}$ .....Persamaan 3.37

dengan:

Ψ = intensitas aliran

d = ukuran butiran rata-rata

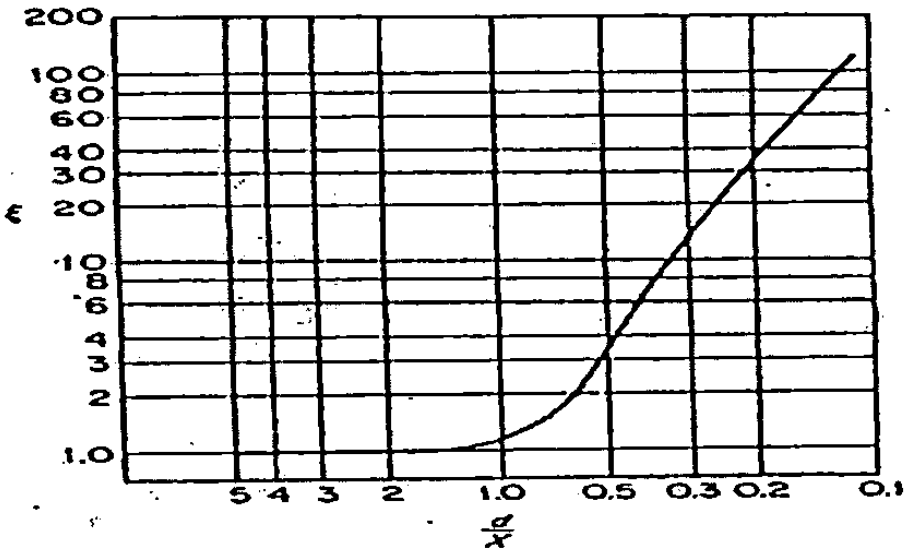
S = Kemiringan dasar saluran

Rb' = jari-jari hidraulik akibat pengaruh kekasaran butiran

Untuk ukuran fraksi butiran, d = d x 10^{-3} *m*

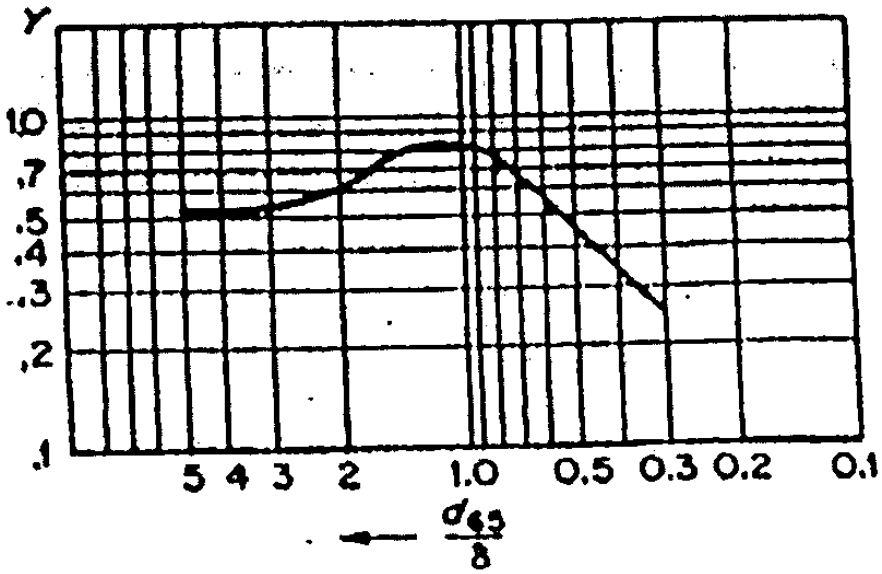
d Persamaan 3.38

Untuk $\frac{d}{x}$ dari Gambar 3.26, diperoleh nilai *hiding factor,* ξ



Gambar 3.26 Nilai *hiding factor,* ξ

Untuk $\frac{d65}{x}$ dari Gambar 3.27, diperoleh nilai koreksi gaya angkat, Y



Gambar 3.27 Grafik nilai koreksi gaya angkat, Y

Intensitas aliran yang telah dikoreksi dapat diperoleh:

$$\left[\frac{ß}{ß_{,}}\right]^2 = \left[\frac{log(10{,}6)}{log(10{,}6\frac{X}{\Delta})}\right]^2$$ .....Persamaan 3.39

Persamaan 3.40

dengan:

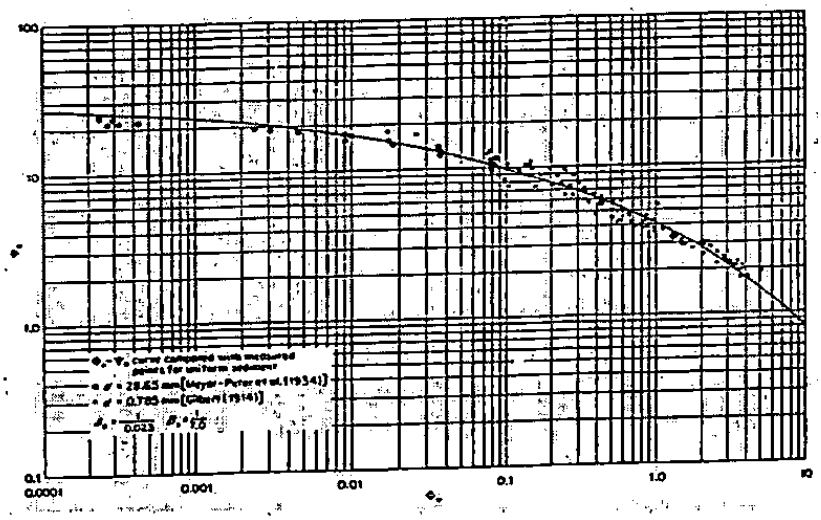
$\Psi_{,i}'$ = intensitas aliran yang telah dikoreksi

ξ = nilai *hiding factor*

Y = nilai koreksi gaya angkat

$\Psi_{,}'$ = intensitas aliran berdasarkan nilai R_b' yang benar

Untuk $\Psi_{,}'$= (..) dari Gambar 3.28 (Grafik Einstein) diperoleh nilai θ., Jika nilai θ. berada di luar kurva maka dianggap nilai θ. =0,0



Gambar 3.28 Grafik Einstein

7.Besar angkutan sedimen suspensi untuk fraksi butiran berukuran d

$$(i_b q_b) = i_b\ \theta.\ \gamma_s\ (g\ d)^{3/2}\ (\psi)^{1/2}$$ .....Persamaan 3.41

dengan:

$(i_b q_b)$ = besar angkutan sedimen suspense setiap fraksi

i_b = nilai % material

θ. = nilai derajat kemiringan pada grafik Einstein

g = gravitasi

$\gamma_s \rightarrow \frac{p}{g}$ = perbandingan antara berat partikel dalam air dengan gaya angkat hidrodinamik sesaat.

d = ukuran butiran rata-rata

ψ = intensitas aliran

Perhitungan selengkapnya untuk menghitung angkutan sedimen dasar sungai

Tabel 3.8. Perhitungan Angkutan Sedimen

	d (mm	i_b (%)	R_b' (m)	Ψ,'	d/x	ξ,	Y	Ψ,$_i$'	θ.	($i_B q_B$) (kg/ms)
1										
2										
3										
								Σ		

Jadi besar angkutan sedimen dapat dihitung dengan persamaan 3.42:

$q_B = (\Sigma\, i_b q_b) \times 60 detik \times 60 menit \times 24 jam \times B$ .....Persamaan 3.42

dengan:

q_B = jumlah angkutan sedimen dasar sungai per hari(ton/hari)

($\Sigma\, i_B q_B$) = besar angkutan sedimen setiap fraksi

B = lebar saluran/sungai

60 detik = per menit

60 menit = per jam

24 jam = per hari

E. Klasifikasi Distribusi Ukuran Butiran

Analisis butiran merupakan dasar tes laboratorium untuk mengidentifikasi tanah dalam sistem klasifikasi teknik. Sedangkan analisis saringan agregat adalah penentuan persentase berat butiran agregat yang lolos dari satu set saringan kemudian persentase digambarkan dalam grafik pembagian butir (SNI 03-1968-1990). Pengujian menggunakan satu set saringan standar *ASTM* (*American Society for Testing and Materials*), Oven untuk mengeringkan sampel, Cawan untuk menyimpan sedimen baik setelah ditimbang maupun sebelum ditimbang, Timbangan untuk menimbang sampel yang tertahan di setiap saringan.

American Society for American Society for Testing and Materials (ASTM)

No Saringan (#)	Ukuran Lubang (*mm*)
75,2 (3")	76,2
63,5 (21/9)	63,5
50,8 (2")	50,8
36,1 (11/2)	36,1
25,4 (1")	25,4
19,1 (1/4")	19,1
12,7 (1/2)	12,7
9,52(3/8)	9,52
No 4	4,75
No 8	2,35
No 20	1,18
No 30	0,6
No 40	0,425
No 50	0,3
No 80	0,177
No 100	0,15
No 200	0,075
pan	>0,075

1. **Cara pengujian di laboratorium:**

   a. Alat yang digunakan :

      1. Satu set ayakan standar, berserta alas (pan) dan penutup.
      2. Alat pengetar.
      3. Timbangan.
      4. Sikat baja/sikat bulu.

   b. Prosedur pengujian

      1. Ayakan dibersihkan dengan menggunakan sikat baja (untuk diameter saringan yang lebih besar) dan sikat bulu (untuk diameter saringan yang lebih kecil).
      2. Berat masing-masing saringan kosong ditimbang.
      3. Saringan satu dengan yang lain menurut ukuran, disusun mulai dari saringan terkecil (pan yang tidak berlubang) sampai ukuran yang terbeser dibagian paling atas.
      4. Contoh sampel (yang sudah dikeringkan dalam oven) di masukkan ke dalam saringan paling atas dan ditutup.
      5. Susunan saringandi tempatkan ke alat pengetar dan getarkan selama kurang lebih 10 menit.
      6. Masing-masing saringan yang berisi sampel di timbang dan di hitung berat sampel masing-masing saringan.

2. **Cara perhitungan analisis distribusi ukuran butir sedimen**

   Agar pengumpulan data mudah maka dipersiapkan formulir pengujian seperti tabel 3.10 :

   Tabel 3.10 Contoh formulir pengujian (Indrawahyuni, 2008).

Proyek	:		Contoh No :		
Lokasi	:		Kedalaman :		
Jenis Tanah	:				
Berat Tanah Kering yang diuji, W			:		gram
Petugas	:		Tanggal	:	
Diperiksa	:		Tanggal	:	
Menyetujui	:		Tanggal	:	

Nomor saringan	Diameter lubang saringan (mm)	Berat tanah yang tertahan saringan	% berat tanah tertahan saringan	% kumulatif dari tanah yang tertahan	% tanah yang lolos saringan
(1)	(2)	(3)	(4)=[(3)/W]x100 %	(5)	(6)=100-(5)

a. Berat tertahan sampel (*gr*) diperoleh dari hasil penimbangan pada masing-masing saringan.

b. Berat tertahan (%)

$$Berat\ tertahan(\%) = \frac{Berat\ tertahan(g)}{Berat\ total\ tertahan(g)} \times 100\% \qquad (3.43)$$

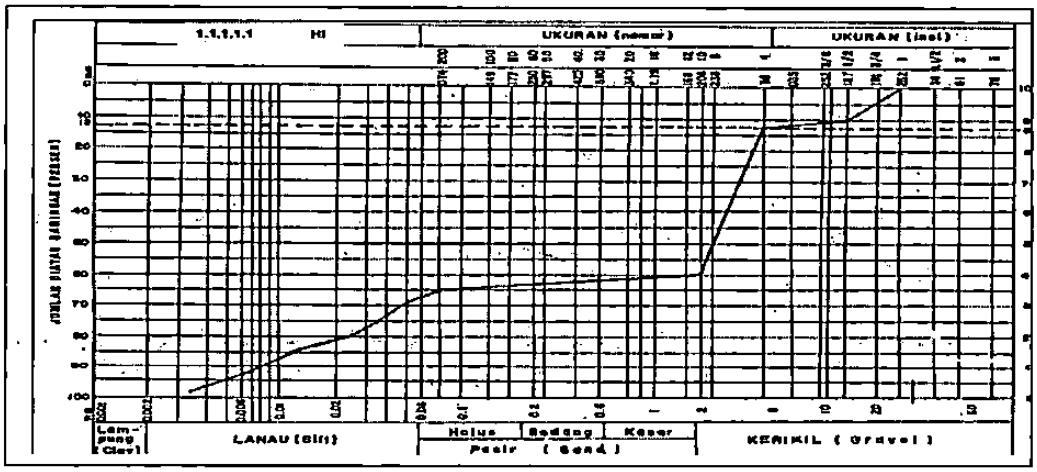
c. Berat komulatif (%)

Berat komulatif sebelumnya (%) + Berat tertahan yang ditinjau (3.44)

d. Berat komulatif lolos ayakan (%)

Berat komulatif lolos ayakan (%) = 100% - berat komulatif (%) (3.45)

e. Gambarkan grafik penyebaran butiran seperti pada gambar 3.29.



Gambar 3.29 Grafik penyebaran butiran (Winditiatama, 2011).

f. Dihitung jumlah tanah yang hilang selama proses pengujian dengan rumus:

$$\frac{W - W_1}{W} \times 100\% \qquad (3.46)$$

Keterangan:

W_1 = berat sebelum pengujian.

W = berat setelah pengujian