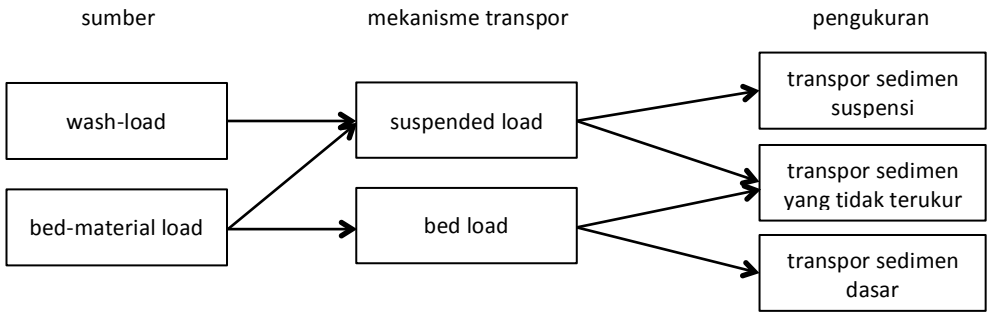
PENGUKURAN TRANSPOR SEDIMEN

Istiarto
Ir. (UGM), M.Eng. (AIT), Dr. (EPFL)
Email: istiarto@ugm.ac.id; web: http://istiarto.staff.ugm.ac.id

1 Transpor Sedimen di Sungai

Aliran di sungai tidak hanya berupa aliran air, tetapi seringkali dibarengi dengan pergerakan material padat yang dikenal dengan istilah transpor sedimen. Transpor sedimen berkaitan erat dengan aliran air. Transpor sedimen terjadi karena adanya aliran air. Transpor sedimen menyebabkan erosi atau deposisi. Dua hal ini mengakibatkan perubahan geometri sungai. Perubahan geometri sungai mengubah aliran air. Perubahan aliran air mengubah transpor sedimen. Hubungan timbal balik antara aliran air, transpor sedimen, dan geometri sungai ini lah ujud dinamika sungai. Ilmu yang mempelajari dinamika sungai dalam kaitan dengan interaksi antara aliran air, transpor sedimen, dan geometri sungai dikenal dengan nama morfologi sungai.

Sedimen di sungai bersumber dari material dasar sungai. Karena gaya-gaya hidrodinamik aliran air, sebagian material dasar bergerak karena gaya-gaya internal butir material dasar sungai tidak mampu menahan gaya dorong aliran air. Butir material dasar sungai tidak hanya bergerak di dekat dasar dengan cara bergeser, berguling, atau loncat, namun dapat pula meninggalkan dasar sungai, melayang dalam aliran air. Gerakan butir material dasar di dekat dasar dikenal sebagai transpor sedimen dasar (*bed load*) dan gerakan butir material dasar yang melayang bersama aliran dikenal sebagai transpor sedimen suspensi (*suspended load*). Selain berasal dari material dasar sungai, sedimen di sungai berasal dari *wash load*. Ini adalah material padat yang sangat halus, lebih halus daripada 0.062 milimeter, dan berjumlah sangat kecil. *Wash load* diperhitungkan sebagai bagian dari *suspended load*. Dalam konteks pengukuran transpor sedimen, debit transpor sedimen total adalah debit transpor sedimen dasar dan debit transpor sedimen suspensi. Hasil pengukuran debit transpor sedimen suspensi mengandung seluruh *wash load* dan dapat saja mengandung *bed load*. Jika hasil pengukuran transpor sedimen dijumlahkan, kemungkinan tidak sama dengan debit sedimen total. Ada sebagian transpor sedimen yang tidak dapat diukur. Gambar di bawah ini merangkum bahasan dalam paragraf ini.



Gambar 1. Penggolongan transpor sedimen menurut sumber sedimen, mekanisme transpor sedimen, dan pengukuran transpor sedimen.

Dalam kaitannya dengan pengukuran transpor sedimen, maka penggolongan transpor sedimen antara transpor sedimen dasar dan transpor sedimen suspensi sangat penting. Masing-masing jenis transpor sedimen ini memiliki prosedur pengukuran sendiri. Sebaliknya, penggolongan antara material dasar dan *wash load* berperan dalam studi morfologi sungai. Informasi mengenai material dasar penting untuk studi erosi-sedimentasi, sedang informasi mengenai *wash load* penting untuk studi sedimentasi di tempat-tempat yang memiliki kecepatan aliran rendah sedemikian hingga partikel halus dapat mengendap. Ini terjadi antara lain di waduk dan di hulu bendung.

Pada umumnya, jamak dimaklumi bahwa transpor sedimen dasar mudah dihitung tetapi sulit diukur. Sebaliknya, transpor sedimen suspensi mudah diukur tetapi sulit dihitung.

2 Pengukuran Transpor Sedimen Dasar

2.1 Cara Pengukuran Transpor Sedimen Dasar

Transpor sedimen dasar umumnya diukur sebagai bobot material sedimen per satuan waktu dan per satuan lebar sungai. Untuk memperoleh debit transpor sedimen dasar, dilakukan pengukuran bobot material sedimen dasar yang melewati suatu tampang sungai selama waktu tertentu. Ada dua cara pengukuran transpor sedimen dasar, yaitu cara **pengukuran langsung** dan cara **pengukuran tak langsung**.

Dalam pengukuran transpor sedimen dasar, sering dijumpai beberapa kesulitan yang mengurangi ketelitian hasil pengukuran, antara lain:

(a) alat ukur transpor sedimen mengakibatkan terganggunaya aliran yang meyebabkan perubahan perilaku dan intensitas sedimen,
(b) kesulitan untuk mempertahankan alat ukur tetap lurus vertikal dan tegak lurus terhadap arah aliran,
(c) alat ukur tidak dapat mengukur semua fraksi butir sedimen dasar, dari yang terkasar sampai terhalus.

Mengingat kesulitan tersebut, beberapa hal di bawah ini perlu dipertimbangkan dalam pengukuran transpor sedimen dasar.

(a) Alat ukur harus dikalibrasi dan efisiensi alat harus ditetapkan secara pasti. Efisiensi adalah rasio antara debit transpor sedimen dasar hasil pengukuran terhadap debit transpor sedimen dasar sesungguhnya.
(b) Pengukuran sebaiknya dilakukan di beberapa titik di setiap tampang lintang pengukuran dan merupakan pengukuran jangka panjang mengingat transpor sedimen dasar berubah terhadap lokasi dan waktu.
(c) Pengukuran harus dilakukan dengan hati-hati sehingga material dasar sungai dan sedimen suspensi tidak ikut terukur.
(d) Perlu diperhatikan bahwa bentuk dasar sungai berpengaruh terhadap cara pengukuran.
(e) Pada dasarnya, tebal lapis aliran di dekat dasar sungai tempat sedimen dasar bergerak tidak mudah untuk diketahui. Tebal lapis ini berbeda untuk setiap sungai. Umumnya, tebal lapis ini paling tidak sama dengan diameter butir material dasar sungai terbesar.

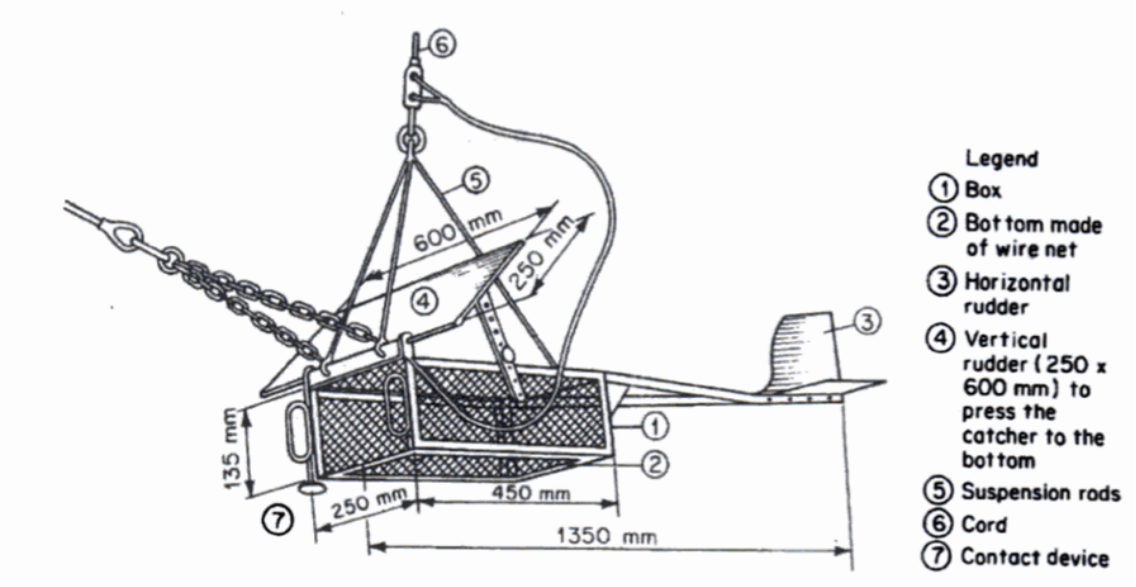
2.2 Pengukuran Transpor Sedimen Dasar Cara Langsung

Pengukuran transpor sedimen dasar secara langsung dilakukan dengan memakai alat ukur jenis: keranjang (*box-and basket-type*), panci (*pan-type*), atau perangkap (*pit-type*).

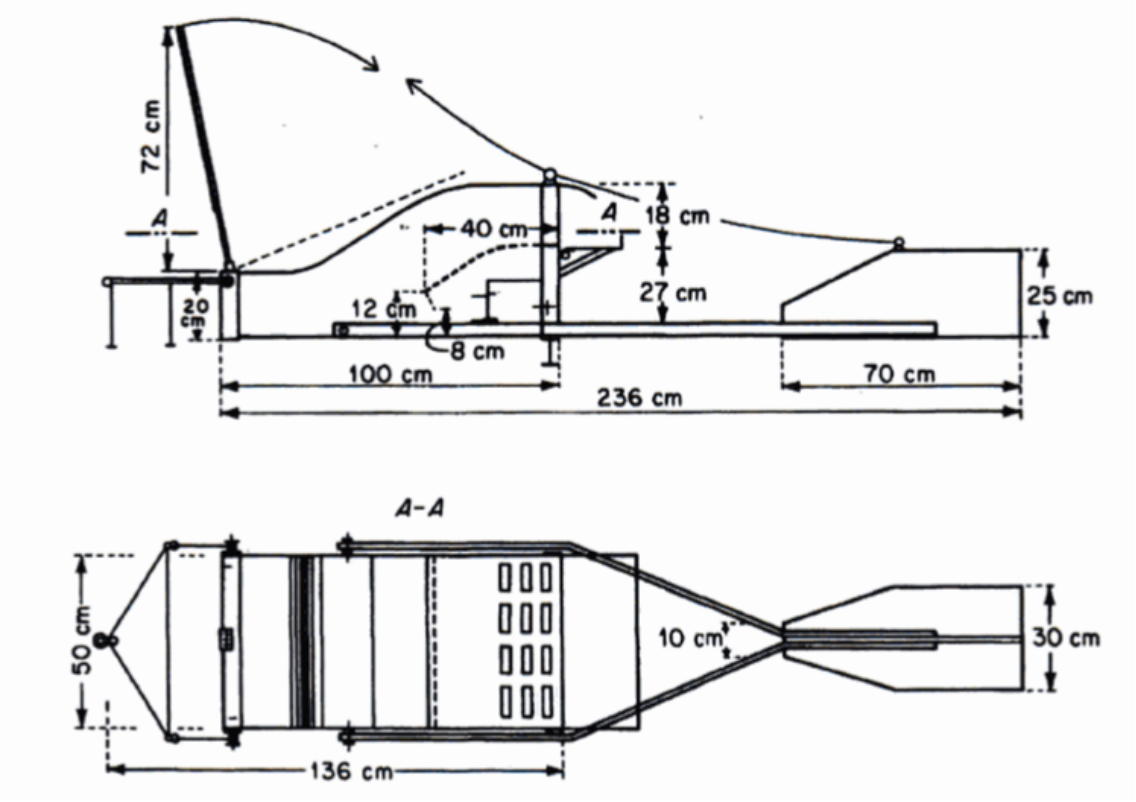
2.2.1 Pengukuran Transpor Sedimen Dasar dengan Alat Ukur Jenis Keranjang (Box- and Basket-type)

Alat ukur transpor sedimen dasar jenis keranjang terdiri dari kotak atau keranjang untuk menangkap sedimen, rangka penyangga, kabel penggantung, dan sirip. Pengukuran dilakukan dengan cara menurunkan alat ukur ke dasar sungai. Ketika alat menyentuh dasar sungai, pintu keranjang terbuka dan pencatat waktu mulai bekerja. Aliran air beserta sedimen masuk ke dalam keranjang. Karena aliran di dalam keranjang melambat, maka sedimen mengendap di dalam keranjang. Selang beberapa saat, pintu alat ukur ditutup dan alat ukur yang berisi sedimen dasar diangkat. Material sedimen dikeluarkan dari keranjang dan ditimbang secara hati-hati.

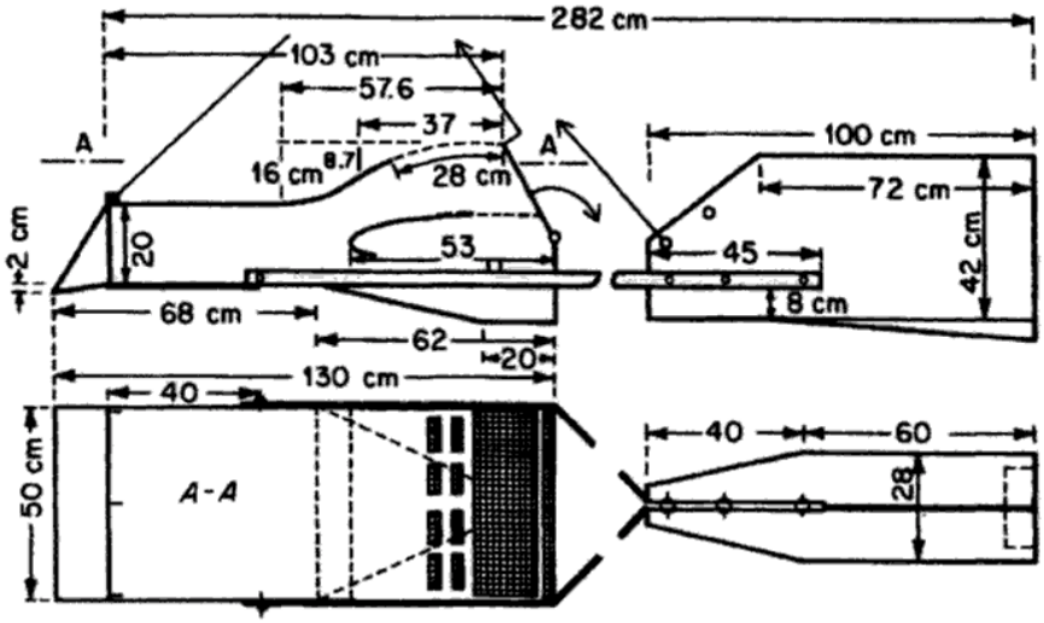
Contoh alat ukur transpor sedimen dasar jenis keranjang antara lain: *Muhlhofer sampler* (Gambar 2), *Karolyi sampler* (Gambar 3), *VUV sampler* (Gambar 4), dan *Arhhem sampler* (Gambar 5). Alat ukur yang terakhir ini lebih dikenal sebagai *Bedload Transport Meter of Arnhem* (BTMA).



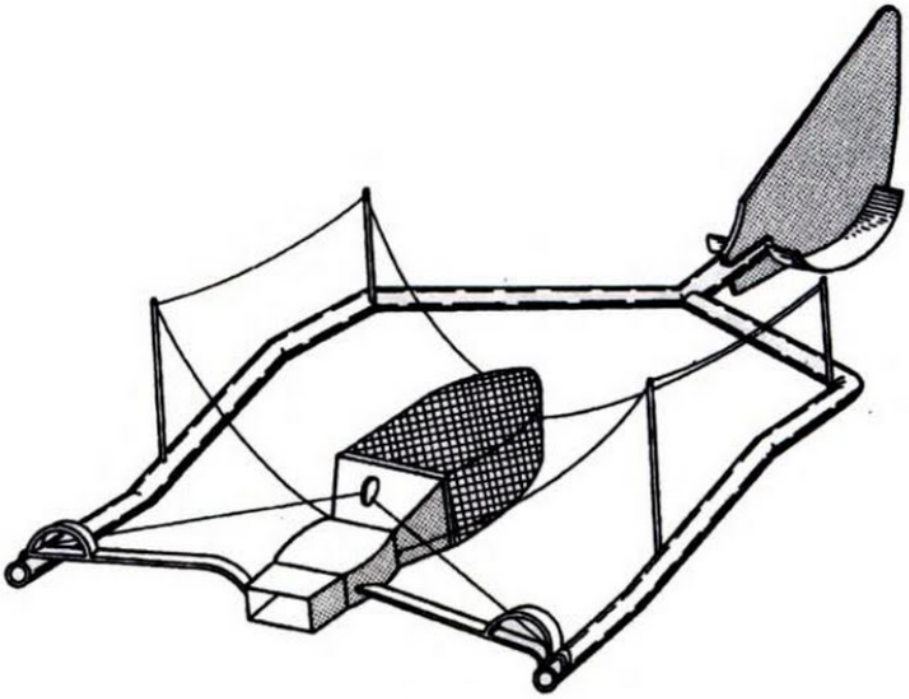
Gambar 2. Alat ukur transpor sedimen dasar, *Muhlhofer sampler*.



Gambar 3. Alat ukur transpor sedimen dasar, *Karolyi sampler*.



Gambar 4. Alat ukur transpor sedimen dasar, *VUV sampler*.



Gambar 5. Alat ukur transpor sedimen dasar, *Bedload Transport Meter of Arnhem* (BTMA).

2.2.2 Pengukuran Transpor Sedimen Dasar dengan Alat Ukur Jenis Panci (Pan-type)

Alat ukur transpor sedimen dasar jenis panci terdiri dari sebuah panci yang memiliki alas dan dua dinding. Sebagian alat ukur jenis ini memiliki *baffle* untuk menahan laju aliran sehingga sedimen mengendap di panci. Alat ukur jenis ini jarang dipakai dan pemakaiannya pun terbatas untuk pengukuran di sungai yang memiliki konsentrasi sedimen dan kecepatan aliran rendah.

2.2.3 Pengukuran Transpor Sedimen Dasar dengan Alat Ukur Jenis Perangkap (Pit-type)

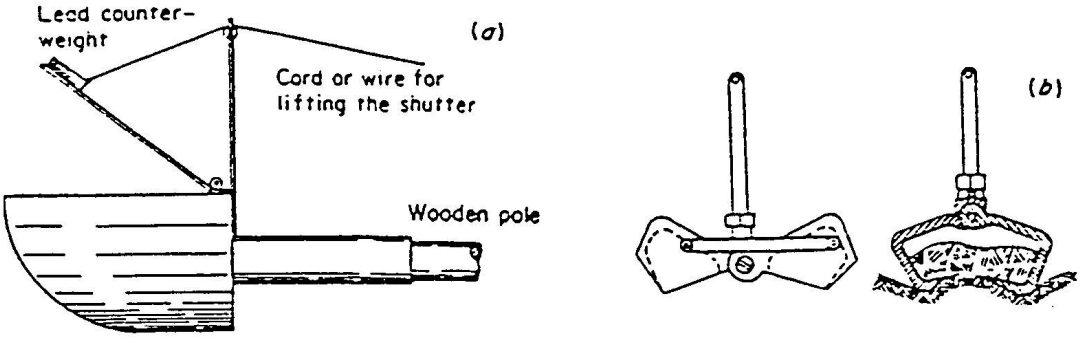
Prinsip pengukuran transpor sedimen dasar dengan alat jenis ini adalah penempatan suatu cekungan di dasar sungai untuk menangkap material sedimen yang bergerak di dasar. Material sedimen yang terperangkap di cekungan itu diambil dengan cara diisap terus-menerus memakai pompa. Dengan demikian, pengukuran debit transpor sedimen dasar cara ini dilakukan secara menerus. Ketelitian pengukuran dengan alat ukur jenis perangkap ini cukup tinggi.

2.3 Pengukuran Transpor Sedimen Dasar Cara Tak Langsung

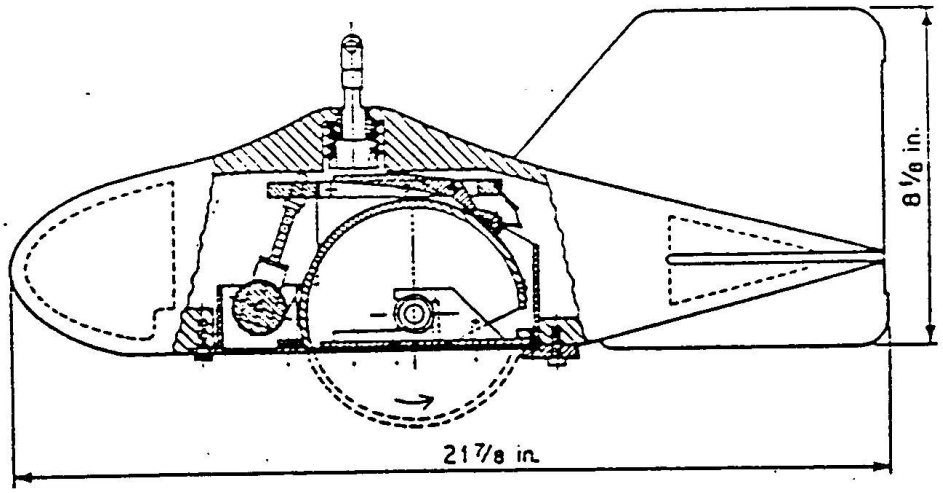
2.3.1 Pengukuran Transpor Sedimen Dasar Melalui Pengukuran Material Dasar Sungai

Pengukuran debit transpor sedimen dasar dengan cara pengukuran material dasar sungai didasari oleh asumsi bahwa hitungan debit transpor sedimen perlu didukung oleh informasi mengenai material dasar. Pada pengukuran transpor sedimen dasar cara ini, sampel material dasar sungai diambil beberapa kali, pada kedalaman aliran yang berbeda-beda, di tempat yang sama.

Alat untuk mengambil sampel material dasar sungai memiliki kelemahan, yaitu tidak mampu mengambil fraksi butir halus material dasar sungai. Alat untuk mengambil sampel material dasar umumnya berbentuk keruk (*grabbing sampler*) atau pipa bor. Contoh alat yang termasuk jenis keruk antara lain adalah alat yang berbentuk sekop (*scoop*), *Van Veen Sampler*, dan US BM-54 atau US BM-60. Jenis sekop dan *Van Veen sampler* dipakai untuk sungai dengan kedalamanan kurang daripada 6 meter. Untuk sungai yang lebih dalam, pengambilan sampel sulit dilakukan dengan US BM-54 atau US BM-60.



Gambar 6. Alat pengambil sampel material dasar sungai jenis (a) sekop, (b) keruk.



Gambar 7. Alat pengambil sampel material dasar sungai, US BM-60.

2.3.2 Pengukuran Transpor Sedimen Dasar Melalui Pengamatan Dasar Sungai

Pengukuran transpor sedimen dasar cara ini dilakukan dengan mengamati perubahan dasar sungai (*bedform*) selama kurun waktu tertentu. Cara ini dapat dipakai pada sungai yang memiliki kecepatan aliran rendah dengan nilai Angka Froude kurang daripada satu. Pada aliran semacam ini, berlaku persamaan berikut:

$$q_s = (1 - m)c_B \frac{\overline{\Delta H}}{2} + C$$

Dalam persamaan tersebut, m adalah porositas material dasar sungai, c_B adalah kecepatan rata-rata perubahan dasar sungai, $\overline{\Delta H}$ adalah tebal rata-rata dasar sungai, dan C adalah konstanta integrasi yang dapat dianggap sama dengan nol.

3 Pengukuran Transpor Sedimen Suspensi

3.1 Cara Pengukuran Transpor Sedimen Suspensi

Transpor sedimen suspensi umumnya diukur sebagai volume sedimen suspensi per satuan waktu dan per satuan lebar sungai. Debit transpor sedimen suspensi diperoleh melalui pengambilan sampel air bercampur sedimen. Konsentrasi sedimen dalam sampel ini dapat diukur. Apabila debit aliran di sungai diketahui, maka debit transpor sedimen suspensi dapat dihitung dari persamaan di bawh ini:

$$Q_{ss} = C_{ss}Q$$

Dalam persamaan di atas, Q_{ss} adalah debit transpor sedimen suspensi, C_{ss} adalah konsentrasi sedimen suspensi dalam sampel air bercampur sedimen, dan Q adalah debit aliran di sungai.

Kesulitan yang sering dijumpai dalam pengukuran transpor sedimen suspensi antara lain adalah terganggunya aliran oleh alat ukur. Untuk membatasi gangguan tersebut, alat ukur transpor sedimen suspensi memiliki lubang (*nozzle*) untuk memasukkan aliran air ke dalam alat ukur. Kecepatan aliran di dalam *nozzle* harus sama dengan kecepatan aliran di sungai. Alat ukur harus vertikal dan tegak lurus terhadap arah aliran.

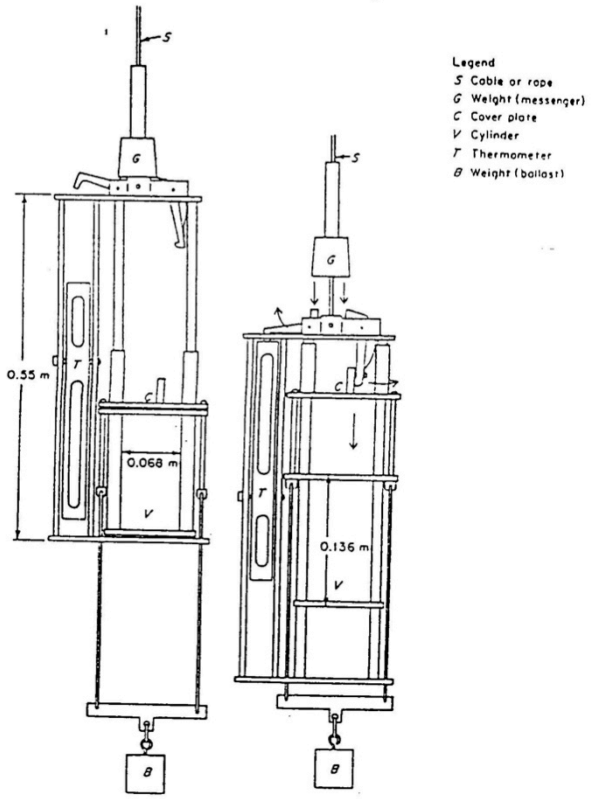
Beberapa faktor berikut ini perlu diperhatikan dalam pengukuran transpor sedimen suspensi.

(a) Pengukuran sebaliknya dilakukan dalam rentang waktu yang cukup panjang mengingat sedimen suspensi berubah-ubah. Material sedimen berada dalam kondisi suspensi sebagai akibat turbulensi aliran.
(b) Pengukuran harus dilakukan dengan hati-hati sehingga transpor sedimen dasar tidak ikut terukur.
(c) Lokasi dan jumlah titik maupun pias-vertikal pengukuran harus ditetapkan dengan mengingat ketelitian hasil yang diinginkan. Pedoman dalam penetapan lokasi ini antara lain adalah:
    (i) satu vertikal di tengah sungai,
    (ii) satu vertikal di bagian terdalam,
    (iii) tiga vertikal di ¼, ½, dan ¾ lebar sungai,
    (iv) tiga vertikal di ⅙, ½, dan ⅚ lebar sungai,
    (v) empat atau lebih vertikal dengan jarak yang sama,
    (vi) vertikal di tengah seksi-seksi yang memiliki debit sama besar.
(d) Pemilihan cara pengukuran di suatu vertikal antara cara *point-integration* atau *depth-integration* harus ditentukan dengan mempertimbangkan infromasi yang dikehendaki, yaitu debit transpor sedimen suspensi rata-rata (dengan cara *depth-integration*) atau distribusi vertikal debit transpor sedimen suspensi (dengan cara *point-integration*).
(e) Pengukuran transpor sedimen suspensi harus dibarengi dengan pengukuran debit aliran sungai.
(f) Perlu diperhatikan bahwa fraksi sedimen yang diukur adalah seluruh material yang tersuspensi, yaitu fraksi material tersuspensi dari material dasar sungai dan *wash load*.

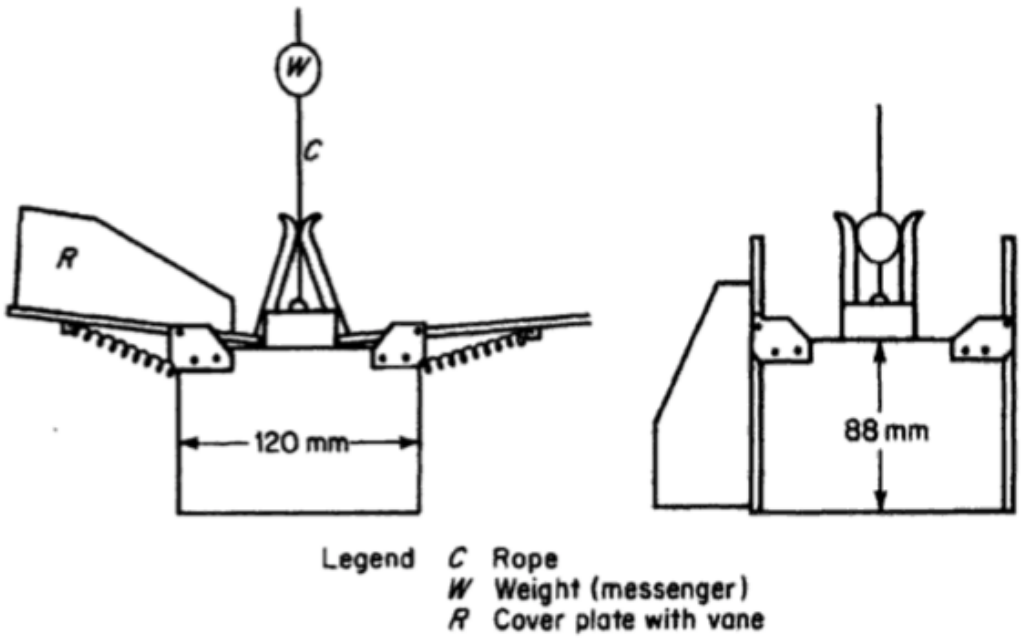
3.2 Pengukuran Sesaat Transpor Sedimen Suspensi

Cara pengukuran sesaat (*instantaneous sampling*) transpor sedimen suspensi cukup sederhana, yaitu dengan menurunkan alat ukur ke kedalaman tertentu untuk menangkap

sampel air dan sedimen. Alat ukur untuk pengukuran cara ini ada dua jenis, yaitu jenis vertikal (Gambar 8) dan horizontal (Gambar 9). Jenis vertikal dikenal dengan nama Botol Nansen.



Gambar 8. Alat ukur transpor sedimen suspensi, *vertical instantanous sampler*.



Gambar 9. Alat ukur transpor sedimen suspensi, *horizontal instantaneous sampler*.

3.3 Pengukuran Terintegrasi Transpor Sedimen Suspensi

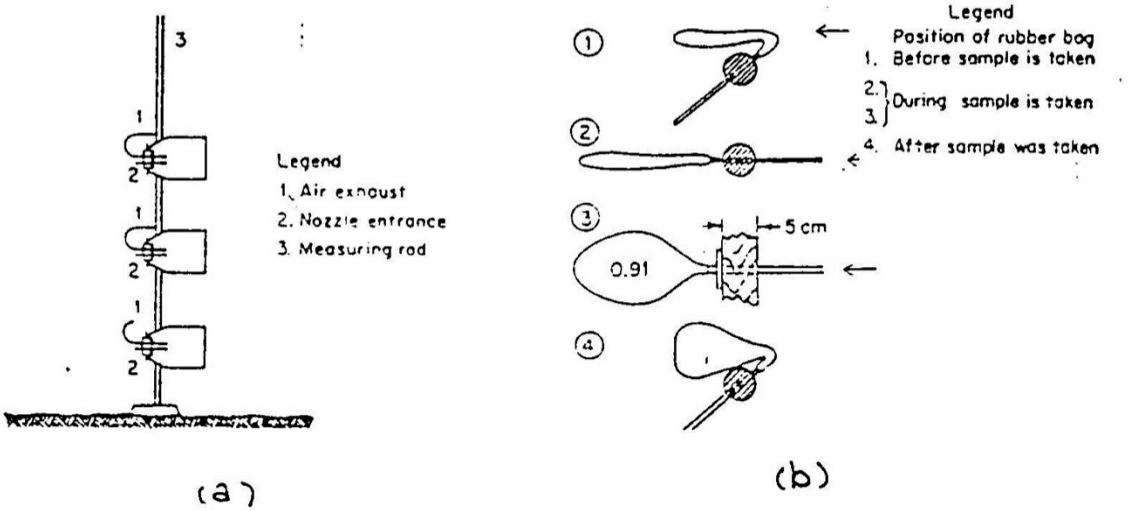
Pengukuran transpor sedimen suspensi cara terintegrasi terdiri dari dua cara. Cara pertama adalah cara integrasi titik (*point-integration*), yaitu dengan cara menurunkan alat ukur ke satu titik kedalaman tertentu dan mengambil sampel air dan sedimen di satu titik tersebut. Cara kedua adalah cara integrasi menerus (*depth-integration*), yaitu dengan cara menurunkan alat ukur dari permukaan ke dasar sungai sambil mengambil sampel air dan sedimen. Alat ukur transpor sedimen suspensi dengan kedua cara tersebut terdiri dari wadah (*container*), nozzle, lubang pelepas udara, sumbat lubang masuk, dan sumbat lubang keluar.

3.3.1 Point-integration Sampling

Prinsip pengukuran transpor sedimen suspensi dengan cara *point-integration* dilukiskan pada Gambar 10. Botol alat ukur transpor sedimen suspensi ditempatkan di titik pengukuran (Gambar 10a). Botol akan terisi air secara perlahan dan botol hanya sedikit menganggu aliran. Apabila botol dapat dimasukkan ke dalam aliran dengan cepat, maka tidak diperlukan katup buka-tutup. Sebaliknya, apabila botol tidak dapat dimasukkan ke titik pengukuran dengan cepat, maka botol memerlukan katup-tutup.

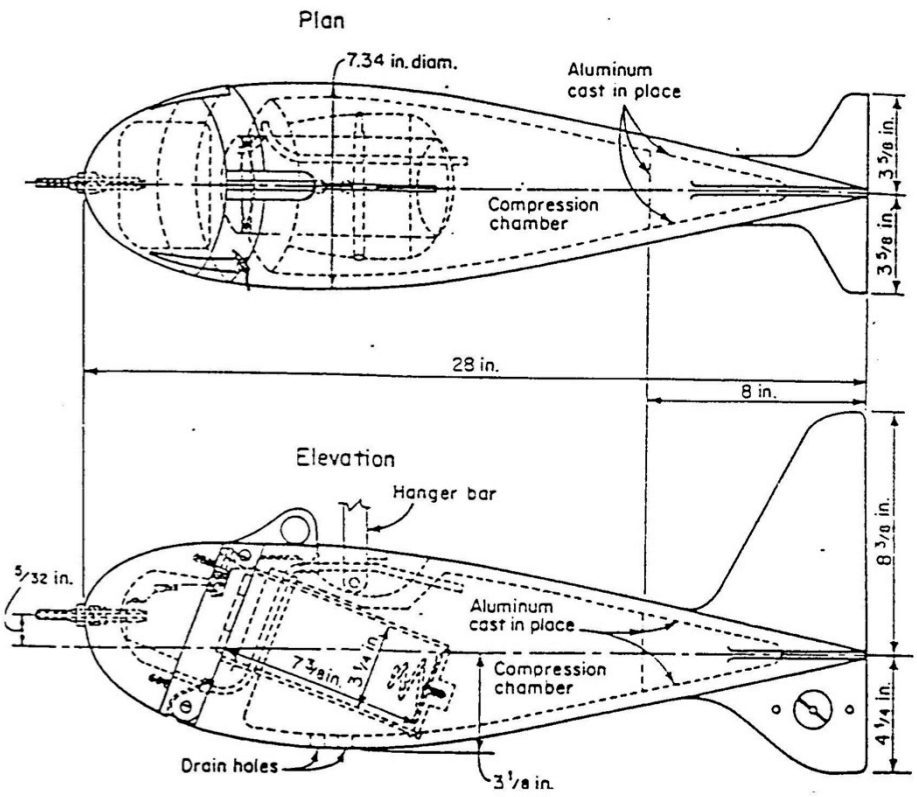
Alat ukur lain untuk pelaksanaan pengukuran dengan cara *point-integration* antara lain adalah Balon Gluschkoff (Gambar 10b), US P-46R, US P-61, dan *single-stage sampler*. Ketiga instrumen yang terakhir dikembangkan oleh *Interagency Committee on Water Resources*.

Balon Gluschkoff terbuat dari balon karet dan pipa. Cara kerja alat ukur ini adalah dengan memasukkan Balon Gluschkoff kedalam titik pengukuran, kemudian pipa diarahkan ke aliran. Sebelum balon terisi penuh, pipa diputar sehingga aliran kedalam balon terhenti. Waktu pengisian balon direkam. Debit aliran adalah volume sampel air dalam botol dibagi waktu pengisian botol. Debit transpor sedimen suspensi diperoleh dari konsentrasi sedimen suspensi dalam sampel air dan debit aliran.



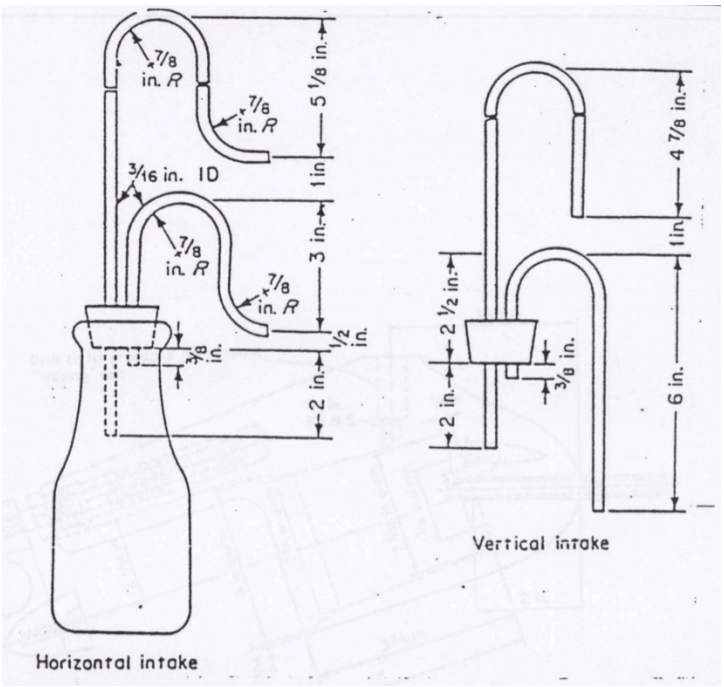
Gambar 10. Alat ukur transpor sedimen suspensi cara *point-integration sampling* (a) botol, (b) Balon Gluschoff.

Alat ukur transpor sedimen suspensi US P-46R dan US P-61 (Gambar 11) dibuat dari perunggu, berbentuk seperti kapal selam dengan sirip belakang, *nozzle*, dan botol penampung sampel. Bobot alat ukur ini sekitar 60 kg.



Gambar 11. Alat ukur transpor sedimen suspensi, *point-integration sampler* US P-61.

Single-stage suspended-load sampler (Gambar 12) terdiri dari botol yang dilengkapi dengan tutup dan dua buah pipa, yaitu satu pipa sebagai jalan masuk dan pipa yang lain sebagai pelepas udara. Alat ukur ini dimaksudkan untuk pengambilan sampel secara automatik, tanpa perlu ditunggui oleh petugas.

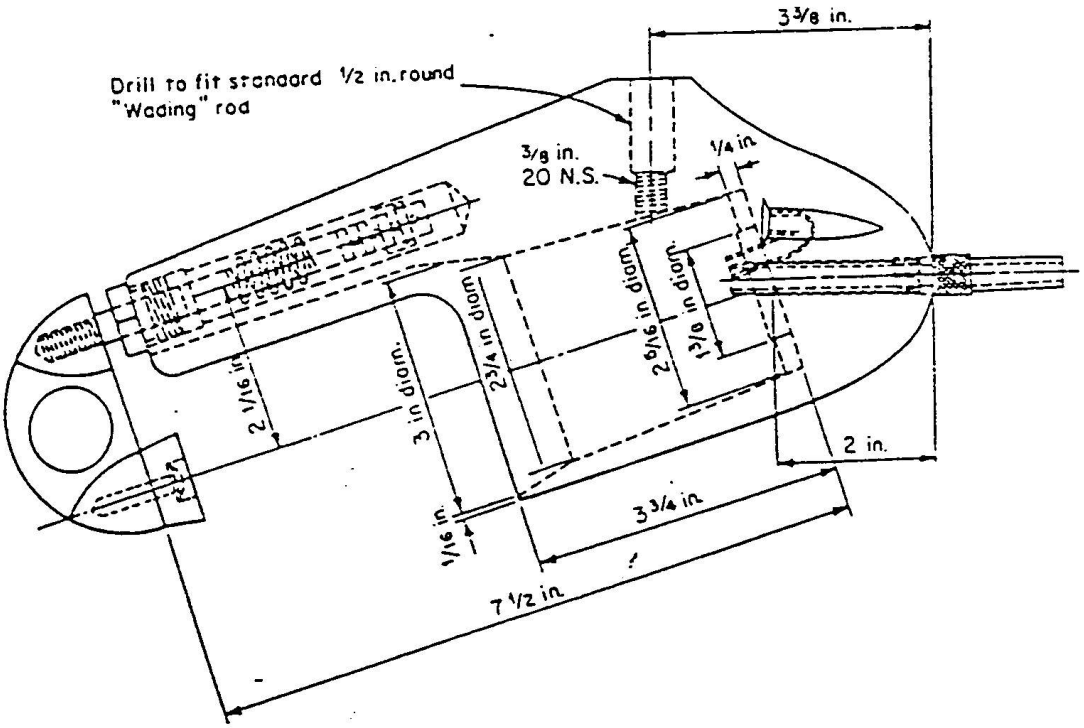


Gambar 12. Alat ukur transpor sedimen suspensi, *single-stage suspended load sampler*.

3.3.2 Depth-integration sampling

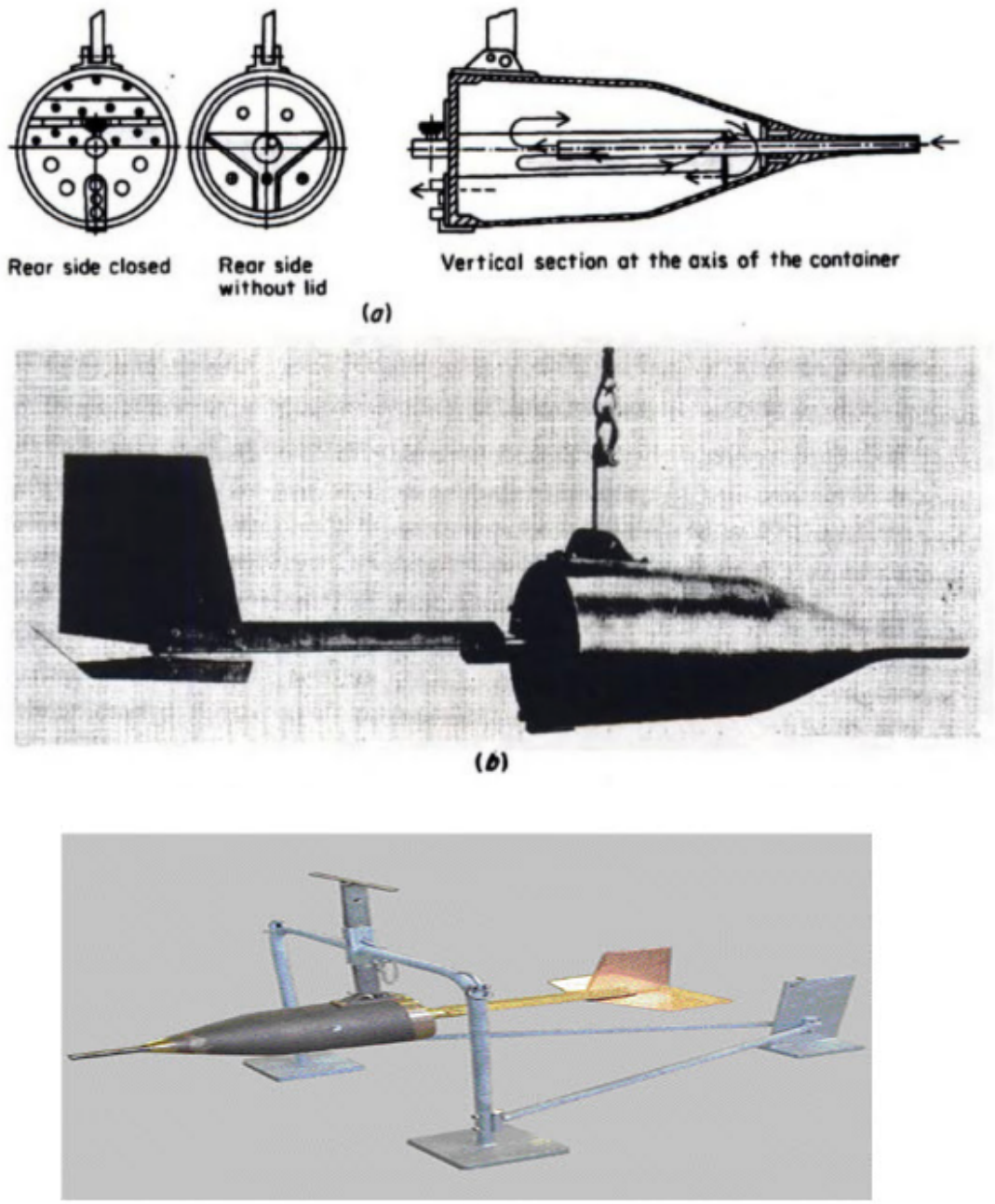
Prinsip pengukuran transpor sedimen suspensi dengan cara *depth-integration sampling* mirip dengan cara *point-integration sampling*. Perbedaan ada pada alat ukur. Pada pengukuran cara *depth-integration sampling*, alat ukur tidak memiliki katup buka-tutup. Alat ukur mulai mengambil sampel saat dimasukkan kedalam air dan berhenti mengambil sampel pada saat keluar dari air. Sejak alat ukur dimasukkan kedalam air sampai dikeluarkan dari air, alat ukur mengukur konsentrasi rata-rata sedimen suspensi. Alat ukur berjalan menempuh seluruh kedalaman sungai dengan kecepatan konstan.

Beberapa *instrumen depth-integration sampling* telah dikembangkan oleh *The Interagency Committee on Water Resources*, yaitu US DH-48, US DH-59, dan US D-49. US D-49 adalah yang terberat, yaitu sekitar 40 kg, sedangkan US DH-48 sangat ringan, sekitar 2.5 kg. US DH-48 (Gambar 13) dibuat dari bahan aluminium.



Gambar 13. Alat ukur transpor sedimen suspensi, *depth-integrating sampler* US DH-48.

Selain alat ukur di atas, alat ukur yang sering pula dipakai untuk mengukur transpor sedimen suspensi adalah *Delft Bottle* (Gambar 14). Alat ukur ini terdiri dari pipa berdiameter 31 cm, *nozzle* berdiameter 2.2 cm, dan tabung tempat sedimen suspensi mengendap.



Gambar 14. Alat ukur transpor sedimen suspensi, *depth-integrating sampler Delft Bottle*.

3.4 Pengukuran Menerus Transpor Sedimen Suspensi

Prinsip pengukuran transpor sedimen suspensi cara menerus adalah bahwa air yang mengandung partikel suspensi akan lebih keruh. Konsentrasi partikel tersebut dapat diukur dengan instrumen yang memancarkan cahaya yang kemudian diterima oleh *photocell* di sisi yang berlawanan. Pembacaan dilakukan dengan *ammeter* yang telah dikalibrasi.

4 Pengukuran Transpor Sedimen Total

4.1 Pengertian

Transpor sedimen total umumnya didapat dari penjumlahan transpor sedimen dasar dan transpor sedimen suspensi. Dengan demikian, salah satu cara untuk mengetahui transpor sedimen total adalah dengan mengukur transpor sedimen dasar dan transpor sedimen suspensi. Namun demikian, mengingat kelemahan-kelemahan dalam pengukuran kedua jenis transpor sedimen tersebut, maka penentuan transpor sedimen total tidak hanya sekadar penjumalahan transpor sedimen dasar dan sedimen suspensi.

Berikut ini diuraikan dua cara pengukuran transpor sedimen total, yaitu cara tak-langsung dan cara langsung (dengan *tracer*).

4.2 Pengukuran Transpor Sedimen Total Cara Tak-langsung

Pengukuran transpor sedimen total cara tak-langsung dilakukan dengan cara sebagai berikut ini.

(a) Mengambil sampel material dasar sungai dan menghitung transpor sedimen dasar dan transpor sedimen suspensi untuk setiap fraksi ukuran butir material dasar. Transpor sedimen total adalah penjumlahan transpor sedimen dasar dan transpor sedimen suspensi.
(b) Mengukur transpor sedimen dasar dan menghitung (secara analitis) transpor sedimen suspensi.
(c) Mengukur transpor sedimen suspensi dan menghitung (secara analitis) transpor sedimen dasar.

4.3 Pengukuran Transpor Sedimen Total dengan *Tracer*

Pelacakan partikel-partikel yang diberi tanda dalam suatu campuran sedimen dan air dapat memberikan gembaran atau informasi mengenai pergerakan butir sedimen. Pergerakan butir-butir sedimen yang ditandai dipelajari dan diukur. Hasil pengukuran dipakai sebagai dasar penetapan transpor sedimen secara kualitatif ataupun kuantitatif.

Cara pelaksanaan pengukuran transpor sedimen total dengan pelacakan *tracer* terdiri dari langkah-langkah yang dipaparkan di bawah ini.

(a) Pemilihan jenis *tracer* yang sesuai.
(b) Pemberian tanda pada butir sedimen dengan *tracer*.
(c) Butir sedimen yang telah ditandai dimasukkan kedalam aliran.
(d) Setelah beberapa waktu, setelah butir-butir sedimen menyebar, dilakukan pengambilan sampel butir sedimen.
(e) Interpretasi dilakukan, baik secara kualitatif maupun kuantitatif, terhadap data persebaran butir sedimen yang telah ditandai.

Jenis *tracer* yang dipakai harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

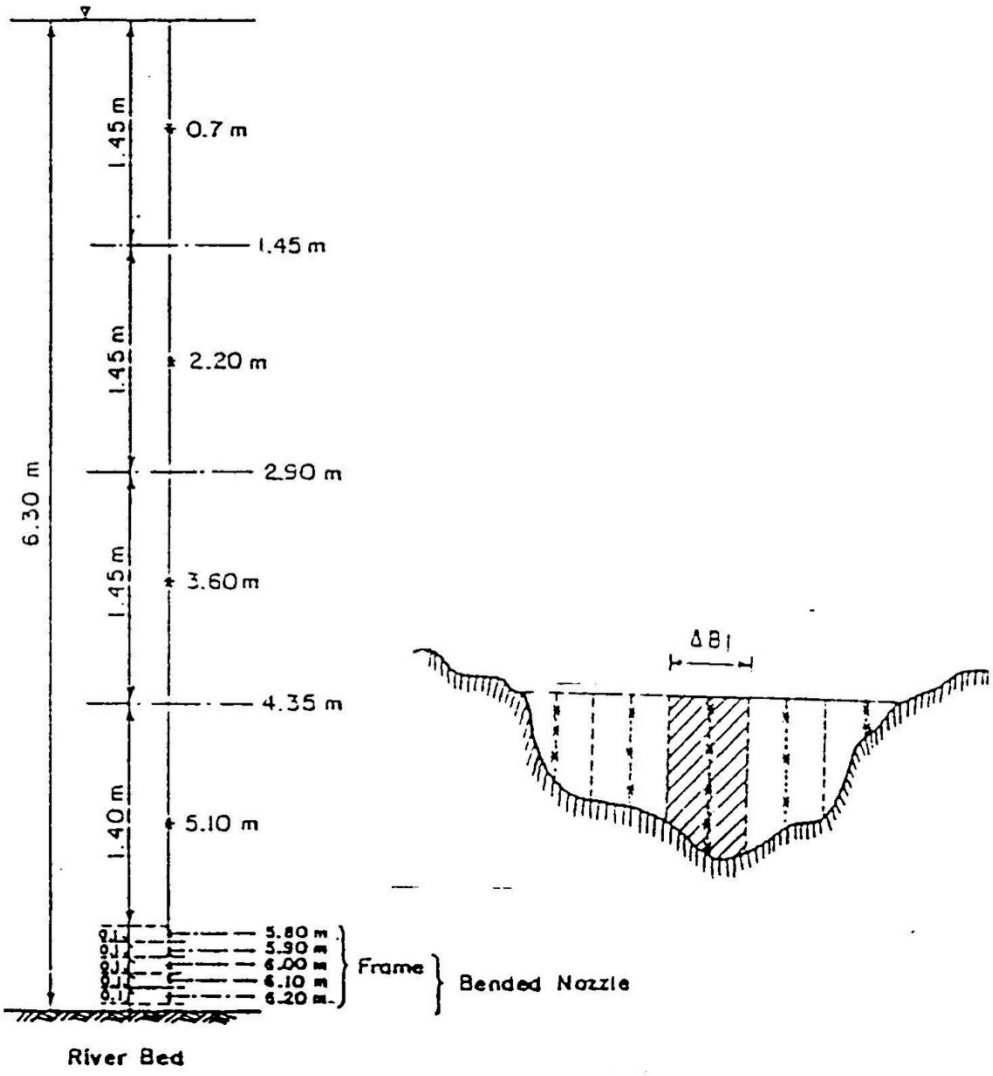
- Karakteritika *tracer* dan sedimen harus identik.
- Pemberian *tracer* tidak boleh terlalu menganggu/mengubah proses transpor sedimen.
- Perilaku *tracer* harus dapat diukur.

- Perilaku *tracer* harus menunjukkan perilaku sedimen, dalam arti perilaku sedimen harus dapat disimpulkan berdasarkan perilaku *tracer*.
- Selain persyaratan teknis diatas, *tracer* harus pula memenuhi persyaratan biaya dan lingkungan, antara lain: biaya pembuatan tidak boleh terlalu mahal dan *tracer* tidak berbahaya bagi lingkungan.

Pada saat ini, jenis tracer yang umum dipakai adalah *tracer* radioaktif, cat dan *fluorescent*, serta *density tracer*.

5 Contoh Pengukuran Transpor Sedimen

Berikut ini adalah contoh hitungan transpor sedimen berdasarkan data pengukuran transpor sedimen suspensi dengan Delft Bottle dan transpor sedimen dasar dengan BTMA. Gambar 15 memberikan ilustrasi titik-titik pengukuran. Pengukuran transpor sedimen dasar dilakukan dengan BTMA, sedangkan pengukuran transpor sedimen suspensi dilakukan dengan *Delft Bottle*. Tabel 1 menampilkan hitungan debit transpor sedimen dasar dan Tabel 2 menampilkan hitungan debit transpor sedimen suspensi.



Gambar 15. Lokasi pengukuran transpor sedimen.

Tabel 1. Hitungan transpor sedimen dasar (pengukuran dilakukan dengan BTMA).

No.	Durasi *sampling* [menit]	Volume sampel [cm^3]	Faktor koreksi[1] $\alpha_{bed\text{-}load}$	Debit transpor sedimen [m^3/hari/m]
(1)	(2)	(3)	(4)	$(5) = \frac{(3)}{(4)} \times \frac{24 \times 60}{10^6}$
1	1	28	0.085	0.47
2	1	22	0.085	0.37
3	1	25	0.085	0.42
4	1	25	0.085	0.42
5	1	20	0.085	0.34
6	1	30	0.085	0.51
7	1	20	0.085	0.34
8	1	25	0.085	0.42
9	1	15	0.085	0.25
10	1	18	0.085	0.30
			Jumlah	3.84
			Rata-rata	0.384

[1)] Faktor koreksi ini diberikan oleh pabrikan alat ukur.

Tabel 2. Hitungan transpor sedimen suspensi (pengukuran dilakukan dengan *Delft Bottle*).

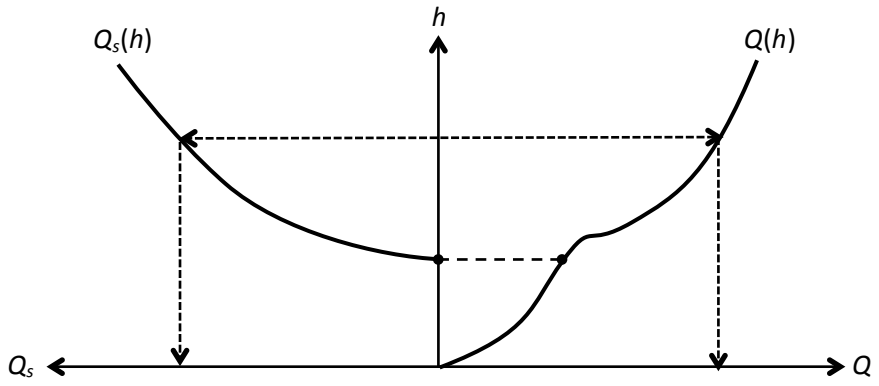
Kedalaman [m]	Durasi *sampling* [menit]	Faktor koreksi $\alpha_{suspended\ load}$	Luas *nozzle* [cm^2]	Volume sampel [cm^3]	Debit transpor sedimen [m^3/hari/m^2]	Tinggi [cm]	Debit transpor sedimen [m^3/hari/m]
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	$(6) = \frac{(3)\times(5)}{(2)\times(4)} \times \frac{60\times24}{10^2}$	(7)	(8) = (6) × (7)
0.70	3	1	1.9	23	58	1.45	84.1
2.20	3	1	1.9	12	30	1.45	43.5
3.60	3	1	1.9	20	51	1.45	74.0
5.10	3	1	1.9	30	76	1.40	106.4
5.80	3	1	1.9	36	91	0.10	9.1
5.90	3	1	1.9	76	192	0.10	19.2
6.00	3	1	1.9	14	35	0.10	3.5
6.10	3	1	1.9	53	184	0.10	13.4
6.20	3	1	1.9	128	323	0.10	32.3
						Jumlah	385.5

Debit transpor sedimen total per lebar pias = Q_{si} = 0.384 = 385.5 = 385.884 m^3/hari/m.

Debit transpor sedimen total seluruh tampang sungai = $\sum_{i=1}^{n} Q_{si}\Delta B_i$.

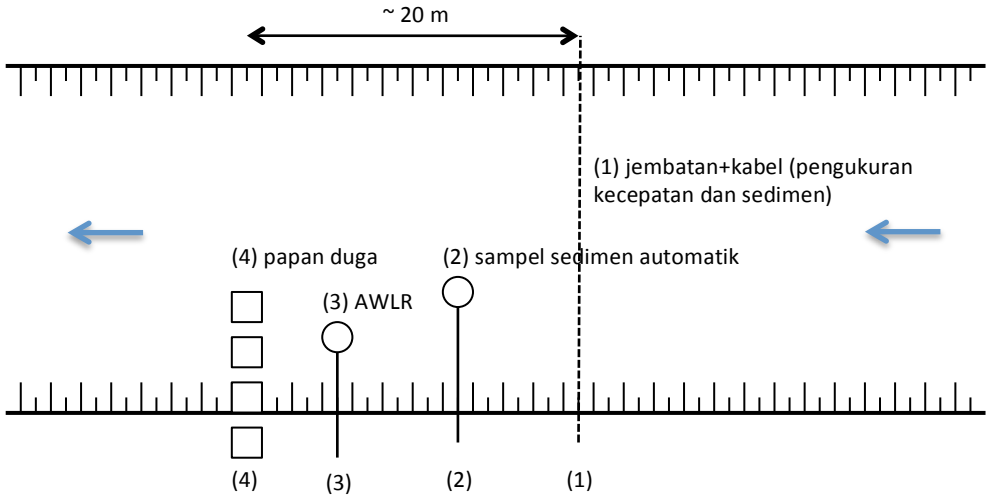
6 Kurva Ukur Debit Sedimen (*Sediment Rating Curve*)

Kurva ukur debit (*sediment rating curve*) adalah kurva yang menunjukkan hubungan antara elevasi muka air dan debit transpor sedimen di suatu tampang lintang sungai. Kurva ini mirip dengan kurva ukur debit, yang menunjukkan hubungan antara elevasi muka air dan debit aliran. Kurva ukur debit sedimen bersama dengan kurva ukur debit aliran (Gambar 16) memberikan informasi yang lengkap mengenai aliran di tampang lintang sungai bersedimen (*erodible bed river*).



Gambar 16. Kurva ukur debit sedimen dan kurva ukur debit aliran di suatu tampang lintang sungai.

Untuk mendapatkan kurva ukur debit sedimen, pengukuran tentu saja harus dilakukan berkali-kali, setiap kali pada posisi muka air yang berlainan. Pada saat yang sama, pengukuran debit aliran harus pula dilakukan. Oleh karena itu, lokasi pengukuran transpor sedimen haruslah di tempat yang sama, atau di dekat, lokasi pengukuran debit aliran. Gambar 17 memberikan ilustrasi lokasi pengukuran debit aliran dan transpor sedimen.



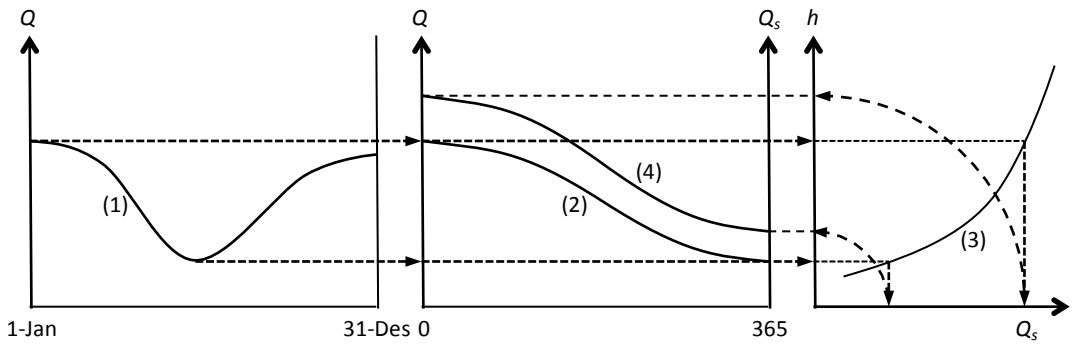
Gambar 17. Stasiun pengukuran transpor sedimen dan debit aliran.

Dalam memilih tampang lintang tempat pengukuran, perlu diperhatikan butir-butir di bawah ini.

(a) Lokasi stasiun pengukuran berada di alur sungai yang lurus dan stabil, alur tidak berpindah-pindah, dan kemiringan dasar sungai seragam.

(b) Tampang lintang sungai seragam di sepanjang alur tersebut.
(c) Tampang lintang sebaiknya berupa tampang tunggal, hanya berupa alur utama tanpa bantaran.
(d) Bentuk dasar sungai sebaiknya rata, tanpa *bedform*.
(e) Akses ke lokasi stasiun mudah dan dekat dekat suplai listrik.

Salah satu kegunaan kurva ukur debit sedimen adalah untuk memprediksi transpor sedimen tahunan. Data yang diperlukan untuk prediksi transpor sedimen tahunan, selain kurva ukur debit sedimen, adalah kurva debit aliran tahunan. Kurva ini diperoleh dari data pengukuran elevasi muka air selama satu tahun. Dengan bantuan kurva ukur debit aliran, data elevasi muka air diubah menjadi kurva debit aliran selama satu tahun. Kurva ini tidak lain adalah hidrograf debit aliran periode satu tahun. Bersama-sama dengan kurva ukur debit sedimen, hidrograf debit aliran selanjutnya diubah menjadi kurva massa debit aliran dan kurva massa debit sedimen. Gambar 18 memberikan ilustrasi langkah pembuatan kurva massa debit sedimen.



(1) Kurva debit aliran, hidrograf debit aliran
(2) Kurva massa debit aliran
(3) Kurva ukur debit sedimen
(4) Kurva massa debit sedimen

Luas di bawah kurva (4) adalah debit transpor sedimen selama setahun yang melewati tampang lintang stasiun pengukuran.

Gambar 18. Pembuatan kurva massa debit sedimen untuk keperluan prediksi transpor sedimen tahunan.

Langkah pembuatan kurva massa debit sedimen dipaparkan di bawah ini.

(a) Ubah data elevasi muka air dari stasiun AWLR menjadi data debit aliran dengan menggunakan kurva ukur debit aliran.
(b) Susun hidrograf debit aliran selama setahun dengan merata-ratakan data debit aliran selama beberapa tahun. Sebagai contoh, jika panjang data debit aliran adalah 10 tahun, maka debit aliran 1-Jan adalah nilai rata-rata dari 10 buah debit aliran 1-Jan. Gambar 18 paling kiri adalah hidrograf debit aliran selama setahun.
(c) Urutkan debit aliran dari nilai terbesar ke nilai terkecil dan tampilkan dalam bentuk grafik yang dikenal sebagai kurva massa debit aliran. Kurva nomor 2 pada Gambar 18 tengah adalah kurva massa debit aliran.
(d) Ubah nilai debit aliran dari kurva massa debit aliran menjadi nilai debit sedimen dengan menggunakan kurva ukur debit sedimen (Gambar 18 paling kanan).
(e) Susun kurva massa debit sedimen dengan cara memplotkan nilai debit sedimen berdasarkan urutan debit aliran pada kurva massa debit aliran (kurva nomor 4 pada Gambar 18 tengah).

Kurva massa debit berguna, antara lain, untuk memperkirakan transpor sedimen tahunan. Luas di bawah kurva massa debit sedimen (kurva nomor 4 pada Gambar 18) dari hari ke-0 sampai dengan hari ke-365 adalah transpor sedimen selama setahun yang melalui tampang lintang sungai di tempat pengukuran.

7 Daftar Pustaka

Graf, Walter Hans, *Hydraulics of Sediment Transport*, Water Resources Publication, Colorado, 1984.

Jansen, P. Ph., van Bandegom, L, van de Berg, J, de Vries, M. Zanen A, *Principles of River Engineering*, The non-tidal alluvial river, Pitman, London, 1979.

Tingsanchali, Tawatchai, River Engineering, *Lecture Note*, Division of Water Resources Engineering, AIT, Bangkok, 1988.