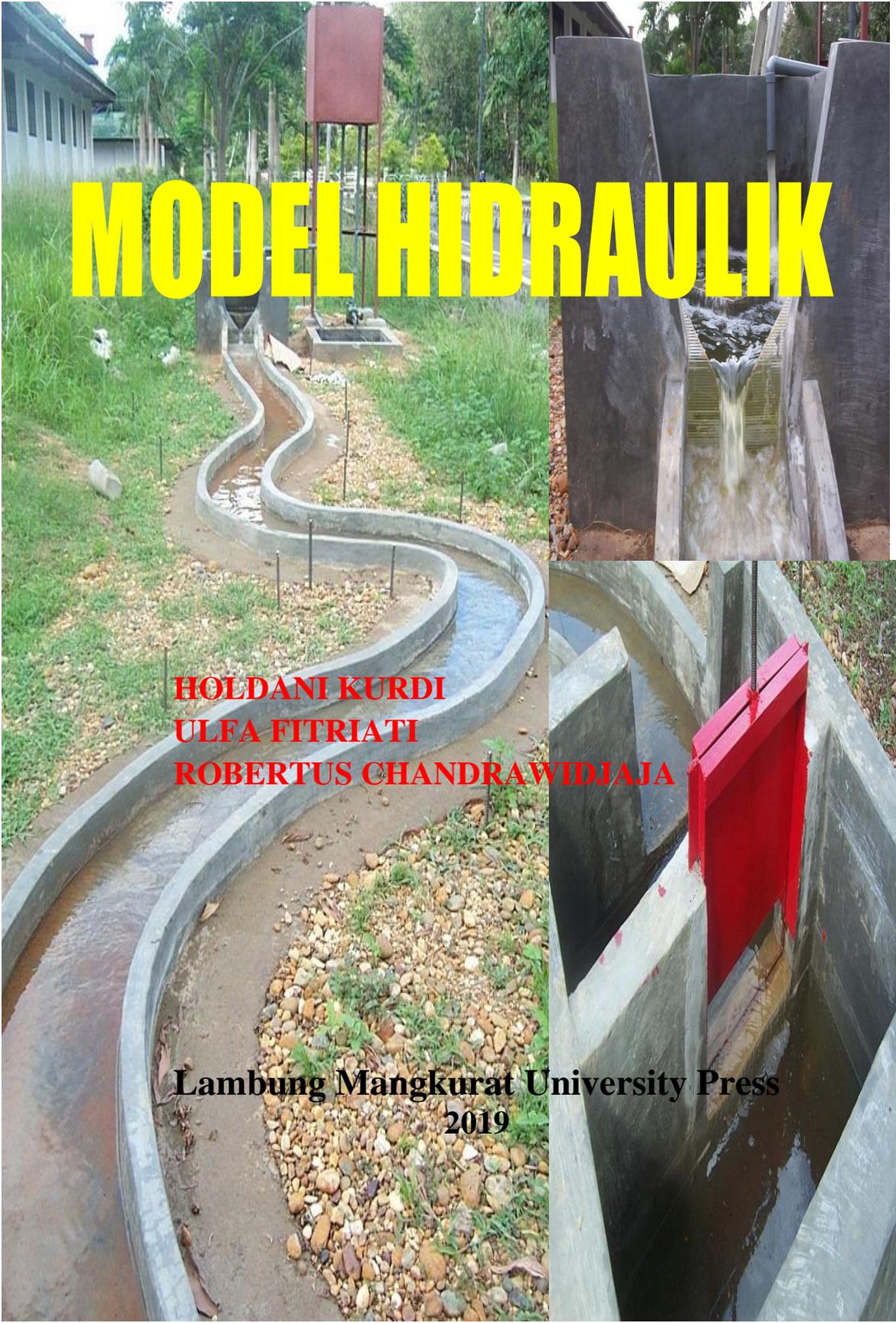


MODEL HIDRAULIK

**HOLDANI KURDI
ULFA FITRIATI
ROBERTUS CHANDRAWIDJAJA**

**Lambung Mangkurat University Press
2019**



MODEL HIDRAULIK

Holdani Kurdi

Ulfa Fitriati

Robertus Chandrawidjaja

Diterbitkan oleh:

Lambung Mangkurat University Press, 2019

d/a Pusat Pengelolaan Jurnal dan Penerbitan ULM
Lantai 2 Gedung Perpustakaan Pusat ULM Jl. Hasan Basri,
Kayutangi, Banjarmasin, 70123
Telp/Fax. 0511-3305195

Hak cipta dilindungi oleh Undang-undang

Dilarang memperbanyak buku ini sebagian atau seluruhnya,
dalam bentuk dan cara apapun, baik secara mekanik maupun
elektronik, termasuk fotokopi, rekaman dan lain-lain tanpa izin
tertulis dari penerbit

v + 107 hlm. 15,5 x 23 cm Cetakan Pertama, Januari 2019

Sampul dan layout : Robertus Chandrawidjaja

Editor : Novitasari

ISBN: 978-602-6483-82-9

DAFTAR ISI

| | |
|--|----|
| DAFTAR ISI..... | ii |
| DAFTAR GAMBAR | iv |
| DAFTAR TABEL | v |
| DAFTAR SIMBOL | vi |
| PRAKATA | ix |
| KATA PENGANTAR | x |
| BAB I. MODEL HIDRAULIK..... | 1 |
| 1.1 Peranan Model Hidraulik | 1 |
| 1.2 Macam Model Hidraulik | 2 |
| 1.3 Prinsip Modelisasi (“Modelling”)..... | 3 |
| 1.4 Prinsip “Scaling” | 6 |
| BAB II. ILMU PENDUKUNG MODEL HIDRAULIK..... | 19 |
| 2.1 Analisis Dimensi | 19 |
| 2.2 Statistik..... | 36 |
| 2.3 Instrumentasi dan Sistem Kontrol | 43 |
| BAB III. REPRODUKSI FENOMENA HIDRAULIK | 47 |
| 3.1 Umum | 47 |
| 3.2 Aliran Muka Air Bebas (“Free Surface Flow”)..... | 51 |

| | |
|---|-----------|
| 3.3 Gelombang | 58 |
| 3.4 Proses Morfologi..... | 64 |
| BAB IV. PERENCANAAN MODEL HIDRAULIK | 71 |
| 4.1 Pendahuluan | 71 |
| 4.2 Perencanaan Model Hidraulik dengan Dasar Tetap ("Fixed/Rigid Bed Model")..... | 73 |
| 4.3 Perencanaan Model Hidraulik untuk Gerusan Lokal | 80 |
| 4.4 Perencanaan Model Hidraulik dengan Dasar Tidak tetap ("Moveable/Mobile Bed Model") | 82 |
| 4.5 Perencanaan Model Hidraulik pada Sistem Perpipaan..... | 90 |
| DAFTAR PUSTAKA | 96 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|---|----|
| Gambar 1.1 Sket Penyelesaian Masalah Lewat Modelisasi .. | 4 |
| Gambar 2.1 Proses untuk Mendapatkan Informasi dari Model | 45 |
| Gambar 3.1 Kekasaran Buatan dengan Mempergunakan Blok Beton yang Diatur di Dasar Model | 64 |
| Gambar 3.2 Kekasaran Buatan dengan Mempergunakan Gravel yang Disebar di Dasar Model | 65 |
| Gambar 3.3 Sketsa Parameter Angkutan Sedimen vs Parameter Aliran | 71 |
| Gambar 4.1 Ringkasan penentuan skala model – proses morfologi..... | 96 |
| Gambar 4.2 Penentuan debit dominan | 97 |

DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 2.1 Dimensi berbagai variabel di Teknik Hidraulik..... | 19 |
| Tabel 3.1 Kriteria batas aliran turbulen sempurna | 45 |

DAFTAR SIMBOL

- A : Luas
a : Percepatan linier, tinggi, kedalaman
- B : lebar
b : lebar
- C : Kekasaran Chezy, koefisien, kecepatan rambat gelombang
Ca : Bilangan Cauchy
Cd : Koefisien debit, koefisien tekanan air (drag)
C₉₀ : Kekasaran dasar yang disebabkan oleh material d₉₀
- D : Diameter, diameter pasir/material dasar
d₅₀ : ukuran saringan dimana 50% material lolos lewat saringan tersebut (diameter butiran dimana 50% material berdiameter lebih kecil dari diameter tersebut).
- E : Energi, modulus elastisitas
E' : Energi persatuan massa
- F : Gaya
Fr : Bilangan Froud
F : Frekuensi
g : percepatan gravitasi
- H : Tinggi, energi persatuan luas
h : Tinggi, tinggi piezometrik, kedalaman

| | |
|------------|--|
| i | : kemiringan dasar saluran, kemiringan energi |
| i_p | : kemiringan datar/energi pada prototip |
| i_t | : sudut “tilting” |
| K_D | : Koefisien stabilitas |
| K | : Modulus bulk, kekasaran dasar dinding |
| L | : Panjang |
| M | : Massa |
| m | : momentum |
| n_x | : Skala model variabel x |
| P | : Tenaga |
| p | : Tekanan |
| Q | : Debit |
| q | : debit persatuan lebar |
| Re | : Bilangan Reynold |
| r | : Faktor distorsi |
| S | : Transpor sedimen total |
| s | : tinggi kecepatan, transpor sedimen persatuan lebar |
| T | : Periode gelombang, waktu |
| t | : waktu |
| t_m | : waktu morfologi |
| U | : Kecepatan |
| U^* | : Kecepatan gesek |
| U_{cr}^* | : Kecepatan gesek kritis |
| W | : Berat batu lapis lindung |

| | |
|------------|---|
| We | : Bilangan Weber |
| w | : Kecepatan sudut, berat unit, kecepatan jatuh dalam zat cair |
| α | : Sudut, koefisien |
| β | : Sudut, koefisien |
| σ | : Tegangan permukaan |
| μ | : Viskositas dinamik, “ripple factor” |
| τ | : Tegangan gesek, koefisien |
| θ | : Sudut lereng, bangunan/tebing |
| ϕ | : Diameter, fungsi |
| ϵ | : Koefisien |
| ρ | : Rapat massa |
| π | : Produk bilangan tak berdimensi |
| δ | : Tebal lapisan laminar |
| λ | : Panjang gelombang |
| ν | : Viskositas kinematik |
| Δ | : Rapat massa relatif () |
| Δ_x | : selisih parameter x |

PRAKATA

Buku Model Hidraulika ini berharap dapat bermanfaat bagi rekan-rekan dan mahasiswa yang ingin memperdalam ilmu permodelan dibidang keairan.

Bahan Ajar Model Hidraulika diterbitkan atas bantuan khusus dari Bapak Dr.Ir.Nur Yuwono, Dip.HE yang telah menjadi konsultan akademik di Fakultas Teknik ULM sejak tahun 1994 program HED/JICA, dan Ir.Zain Hernady Arifin, untuk itu penyusun menyampaikan terimakasih yang sebesar-besarnya.

Buku kecil ini diterbitkan atas bantuan Dekan Fakultas Teknik dan Ketua program Studi Teknik Sipil Universitas Lambung Mangkurat, yang banyak membantu sehingga terbitnya buku ini disampaikan terimakasih.

Akhirnya disampaikan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh dosen dan mahasiswa Fakultas Teknik yang membantu hingga terbitnya buku ini. Kritik dan saran sangat dihargai untuk perbaikan buku ini.

Banjarbaru, Januari 2019.
Penyusun

KATA PENGANTAR

Buku Model Hidraulik ini membahas tentang perencanaan pekerjaan bangunan air, banyak persoalan atau permasalahan yang tidak dapat dipecahkan dengan rumus-rumus yang ada, hal ini mengingat beberapa rumus yang ada diturunkan dari suatu kondisi tertentu yang belum tentu keadaannya sama dengan kondisi bangunan air yang akan direncanakan. Dalam keadaan seperti ini maka bantuan model hidraulik dalam menyelesaikan permasalahan adalah sangat bermanfaat. Adapun rincian pembahasan pada buku ini:

1. Bab pertama membahas tentang prinsip dasar model hidraulik dan skala.
2. Bab kedua membahas ilmu lain yang diperlukan untuk membuat model hidraulik.
3. Bab ketiga membahas tentang bagaimana mereproduksi sifat-sifat hidraulik dalam sebuah model.
4. Bab terakhir membahas tentang mendesain sebuah model hidraulik

Harapan dari terbitnya buku ini adalah semoga buku ini turut memenuhi kebutuhan keilmuan akademik di teknik sipil terutama untuk bidang sumberdaya air.

Editor

NOVITASARI

BAB I. MODEL HIDRAULIK

I.1. Peranan Model Hidraulik

Dalam perencanaan pekerjaan bangunan air, banyak persoalan atau permasalahan yang tidak dapat dipecahkan dengan rumus-rumus yang ada, hal ini mengingat beberapa rumus yang ada diturunkan dari suatu kondisi tertentu yang belum tentu keadaannya sama dengan kondisi bangunan air yang akan direncanakan. Dalam keadaan seperti ini maka bantuan model hidraulik dalam menyelesaikan permasalahan adalah sangat bermanfaat. Tugas atau peranan model hidraulik dalam mendukung kegiatan perencanaan pekerjaan bangunan air tersebut diantaranya adalah :

- a. Untuk meramalkan kemungkinan yang akan terjadi setelah bangunan dibuat ;
- b. Untuk mendapatkan suatu tingkat keyakinan yang tinggi atas keberhasilan suatu perencanaan bangunan ;
- c. Untuk mengetahui dan atau meramalkan penampilan bangunan serta pengaruh terhadap lingkungan.

Disamping peran tersebut diatas, model hidraulik sangat penting fungsinya dalam pengembangan ilmu hidraulika beserta aplikasinya. Penelitian atau riset yang dilakukan di laboratorium hidraulik biasanya dilakukan dengan model, sehingga pengetahuan tentang cara perencanaan model hidraulik sangat diperlukan dalam dalam rangka pengembangan laboratorium riset hidraulika. Berbagai permasalahan yang belum dapat diformulasikan fenomenanya, dapat dipecahkan lewat penelitian

laboratorium. Penelitian-penelitian dasar dapat dilakukan dilaboratorium, yang hasilnya (biasanya berupa formula atau grafik) dapat dimanfaatkan untuk pemecahan masalah prototip. Formulasi ini juga dapat dipergunakan sebagai masukan di dalam pemakaian atau pengembangan model matematis.

I.2. Macam Model Hidraulik

Model hidraulik yang biasa dipergunakan untuk membantu memecahkan permasalahan teknik hidraulik ada 4 macam, yaitu model matematis, model fisis, model analog dan model campuran (hybrid model).

a. Model matematis (“mathematical modelling”)

Model matematis dibuat apabila permasalahan yang akan diteliti dapat dirumuskan dengan formulasi/persamaan matematis secara detail. Apabila permasalahan tersebut baru, dan belum diketahui dengan baik formulasi matematisnya maka permasalahan ini tidak dapat dipecahkan lewat model matematis.

b. Model fisis (“hydraulic scale model, physical modelling”)

Model fisis dipilih untuk dibuat atau dilakukan apabila fenomena fisik dari permasalahan yang ada di prototip dapat dibuat dengan skala yang lebih kecil dengan kesebangunan yang cukup memadai. Sebagai contoh gelombang pantai tidak dapat diskala terlalu kecil apabila tidak digunakan zat cair yang sama, hal ini akan menyebabkan terjadi ketidaksebangunan antara gaya yang disebabkan oleh

gravitasi, inersia dan gaya berat, dalam model. Tegangan muka dan kekentalan zat cair akan sangat berpengaruh dalam model, padahal diprototip tidak demikian.

c. Model analog

Model ini dibuat apabila permasalahan yang akan diteliti dapat dipindahkan menjadi permasalahan listrik yang berupa arus dan tegangan listrik.

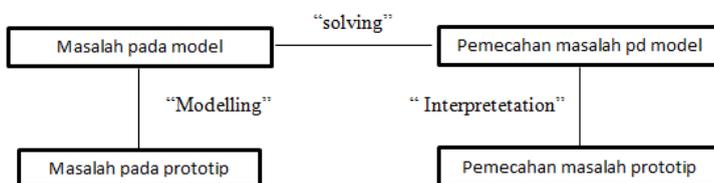
d. Model campuran(hybrid model)

Model hibrid adalah campuran antara model matematis dan model fisis atau sebaliknya. Model ini dipergunakan untuk masalah-masalah yang sangat rumit dan atau menyangkut masalah dana pembangunan yang sangat besar dan atau menyangkut masalah sosial yang luas. Dengan diadakan model gabungan ini diharapkan hasilnya akan memberikan kepastian yang lebih. Kadang-kadang dalam pelaksanaan model fisis juga memerlukan model matematis yang diperlukan sebagai masukan (“input”) atau penggerak suatu alat. Misalnya alat pembangkit gelombang tidak teratur memerlukan program matematik untuk mengatur gerak piston, agar supaya gelombang yang dibangkitkan sesuai dengan yang diharapkan.

I.3. Prinsip Modelisasi (“Modelling”)

Penggunaan model untuk keperluan perencanaan bangunan-bangunan teknik hidraulik pada kenyataannya menggunakan cara melingkar seperti yang diperlihatkan pada

gambar 1.1. Dalam modeliasasi ini terdapat tiga kegiatan yang saling terkait yaitu: “modelling” (proses membuat model), “solving” (proses pemecahan masalah) dan “interpretation” (menginterpretasikan atau menjabarkan hasil penelitian dari model ke prototip). Agar supaya penelitian lewat model tersebut dapat memberikan hasil yang baik maka ketiga kegiatan tersebut diatas haruslah memenuhi kaidah-kaidah yang benar, artinya harus memenuhi persyaratan-persyaratan tertentu.



Gambar 1.1 Sket penyelesaian masalah lewat modelisasi

“Modelling” adalah proses peniruan masalah yang ada di prototip dengan skala yang lebih kecil dan dilakukan dengan cara yang benar. Untuk melakukan modelisasi, peneliti dituntut mempunyai ilmu pengetahuan yang cukup yang berkaitan dengan penentuan fenomena-fenomena yang terdapat dalam permasalahan. Dengan demikian model yang dihasilkan akan merupakan model yang bermanfaat dan hasil-hasil yang didapatkan dari penelitian model dapat diinterpretasikan ke prototip lagi dengan baik.

“solving” adalah usaha penyelesaian masalah yang ada di model. Jadi penyelesaian ini sesungguhnya hanya berlaku di model tersebut. Untuk menyelesaikan permasalahan ini, pembuat model(peneliti) dituntut untuk mempunyai kemampuan dan teknik pemecahan masalah,

karena model itu sendiri tidak menyelesaikan permasalahan dan yang memecahkan masalah adalah penelitiannya.

“Interpretation” adalah suatu usaha untuk memindahkan hasil penyelesaian masalah yang dikerjakan dimodel untuk keperluan pemecahan masalah yang berlaku di prototip. Proses interpretasi ini dilakukan dengan cara yang sama pada waktu membawa permasalahan tersebut ke model (“modelling”).

Agar pada proses pembuatan model tersebut terdapat kesaksamaan yang tinggi maka perlu ada nya dua tahap pengecekan model. Tahap pertama yaitu yang disebut **kalibrasi**. Kalibrasi adalah pengaturan model agar supaya data-data yang ada di prototip sesuai dengan yang ada dimodel. Setelah model memenuhi syarat kalibrasi lalu dilakukan pengecekan tahap kedua yang disebut **verifikasi**. Verifikasi adalah pembuktian bahwa model sudah sesuai dengan yang ada di prototip tanpa mengubah atau mengatur model lagi. Untuk keperluan verifikasi diperlukan data seperti yang dipergunakan pada kalibrasi, tetapi pada kondisi yang lain, pada permasalahan sungai misalnya: data elevasi muka air pada debit yang lain (dengan menggunakan “rating curve” yang berlaku disungai tersebut). Kalibrasi dan verifikasi suatu model merupakan suatu keharusan, namun pada kasus-kasus tertentu kalibrasi dan verifikasi tidak dapat dilakukan mengingat barang yang ada di prototip belum ada atau belum dibuat misalnya pada model bendung, pintu air, bangunan pelimpah dan sebagainya.

I.4. Prinsip “Scaling”

Dasar dasar penyekalan model adalah membentuk kembali masalah atau problema yang ada di prototip dalam skala yang lebih kecil (model), sehingga kejadian (fenomena) yang ada di model tersebut sebangun (mirip) dengan yang ada di prototip. Kesebangunan tersebut berupa :

- Sebangun geometrik (panjang, lebar, tinggi)
- Sebangun kinematik (kecepatan, aliran) dan
- Sebangun dinamik (yang berhubungan dengan gaya)

Hubungan antara model dan prototip di turunkan dengan skala, untuk masing masing parameter mempunyai skala tersendiri dan besarnya tidaklah sama. Skala dapat didefinisikan sebagai rasio antara nilai parameter yang ada di prototip dengan nilai parameter tersebut pada model.

Sebangun Geometrik

Sebangun geometrik dipenuhi apabila model dan prototip mempunyai bentuk yang sama tetapi berbeda ukuran. Hal ini berarti bahwa pertandingan antara semua ukuran panjang adalah sama. Ada dua macam sebangun geometrik yaitu sebangun geometrik sempurna (tanpa di soroti) dengan sebangun geometri dengan distorsi (“distorted”). Pada sebangun geometri sempurna skala panjang arah horisontal (disingkat menjadi skala tinggi) adalah sama, sedangkan pada “distorted model” skala panjang tidak sama dengan skala tinggi. Apabila di mungkinkan model dibuat dengan tanpa distorsi, sedangkan pada permasalahan khusus model dapat dilakukan dengan distorsi namun harus memenuhi beberapa persyaratan tertentu. Skala panjang pada umumnya di beri notasi n_L sedangkan skala tinggi n_h :

$$n_L = \frac{L_p}{L_m} = \frac{\text{panjang pada propit}}{\text{panjang pada model}} \dots\dots\dots (1.1)$$

$$n_h = \frac{h_p}{h_m} = \frac{\text{tinggi pada prototip}}{\text{panjang pada model}} \dots\dots\dots(1.2)$$

Pada sebangun geometrik sempurna dapat ditentukan bahwa :

$$1). \text{ Skala Luas : } n_A = \frac{A_p}{A_m} = \frac{(\text{Panjang} \times \text{Lebar})_p}{(\text{Panjang} \times \text{Lebar})_m} = (n_L)^2 \dots\dots\dots (1.3)$$

$$2). \text{ Skala Volume : } n_V = \frac{V_p}{V_m} = (n_L)^3 \dots\dots\dots (1.4)$$

Sedangkan pada sebangun geometrik dengan distorsi :

1 . a. Skala luas posisi horisontal :

$$n_A = \frac{A_p}{A_m} = \frac{(\text{Panjang} \times \text{Lebar})_p}{(\text{Panjang} \times \text{Lebar})_m} = (n_L)^2 \dots\dots\dots (1.5)$$

b. Skala luas posisi vertikal :

$$n_A = \frac{A_p}{A_m} = \frac{(\text{Panjang} \times \text{Lebar})_p}{(\text{Panjang} \times \text{Lebar})_m} = n_L \times n_h \dots\dots\dots (1.6)$$

$$2. \text{ Skala Volume : } n_v = \frac{V_p}{V_m} = (n_L)^2 \times n_h \dots\dots\dots (1.7)$$

Sebangun Kinematik

Sebangun kinematik terjadi antara prototip dan model jika prototip dan model sebangun geometrik dan perbandingan kecepatan dan percepatan di dua titik yang bersangkutan pada prototip dan model pada arah yang sama adalah sama besar. Pada model tanpa distorsi pada seluruh arah, kecepatan dan percepatan mempunyai perbandingan yang sama, sedangkan pada model dengan distorsi perbandingan yang sama hanya berlaku pada arah tertentu saja, yaitu pada arah vertikal atau pada arah horisontal. Dengan demikian pada permasalahan yang menyangkut aliran tiga dimensi disarankan tidak menggunakan “distorted model”. Skala kecepatan biasanya di beri notasi n_u , skala percepatan n_a dan skala debit n_Q .

$$n_u = \frac{U_p}{U_m} = \frac{n_L}{n_T} \text{ atau } \frac{n_h}{n_T} \dots\dots\dots(1.8)$$

$$n_a = \frac{a_p}{a_m} = \frac{n_L}{n_{T^2}} \text{ atau } \frac{n_h}{n_{T^2}} \dots\dots\dots(1.9)$$

$$n_Q = \frac{Q_p}{Q_m} = \frac{n_L^3}{n_T} \text{ atau } \frac{n_L^2 n_h}{n_{T^2}}$$

Sebangun Dinamik

Jika prototip dan model sebangun geometrik dan kinetik, dan gaya – gaya yan bersangkutan pada model dan prototip untuk seluruh pengaliran pada arah yang sama, maka dikatakan bahwa keduanya adalah sebangun dinamik. Yang di maksud gaya – gaya tersebut diantaranya adalah :

1) Gaya inersia : $F_i = M a = \rho L^3 (L/T^2) = \rho U^2 L^2$

- 2) Gaya tekanan : $F_p = p A = p L^2$
- 3) Gaya berat : $F_w = M g = \rho L^3 g$
- 4) Gaya gesek (viskositas) $F_v = \mu (du/dy) A =$
 $\mu (U/L) L^2$ (1.14)
- 5) Gaya kenyal : $F_e = E A = E L^2$
- 6) Gaya tegangan permukaan = $F_s = \sigma L$

Untuk mendapatkan kesebangunan dinamik antara model dan prototip tidak perlu semua gaya tersebut di atas mempunyai perbandingan yang sama, hanya di pilih gaya – gaya yang penting dalam permasalahan saja yang diperhitungkan. Apabila seluruh gaya tersebut diperhatikan semua maka besar model yang harus di buat adalah sebsar prototip. Untuk menentukan skala model dalam hubungan dengan kesebangunan dinamik, maka dipilih gaya – gaya yang penting saja. Sebagai contoh di bawah ini disajikan pemakaian bilangan tak berdimensi untuk mendapatkan kesebangunan.

Bilangan Reynold :

$$Re = \frac{U L}{\nu}$$

dengan skala bilangan Reynolds adalah,

$$n_{Re} = \frac{Re_p}{Re_m} = \frac{U_p \cdot L_p}{\nu_p} = \frac{V_m}{U_m \cdot L_m} = \frac{n_U \cdot n_L}{n_\nu}$$

.....(1.17)

Bilangan Reynold dapat diekspresikan sebagai rasio antara gaya inersia dengan gaya gesekan (viskositas).

$$\tau = \frac{U \cdot L}{\nu} \text{ atau}$$

$$\frac{(\rho \cdot L^3) \left(\frac{U^2}{L}\right)}{\left(\mu \cdot \frac{U}{L}\right) (L^2)} = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu} = \frac{U \cdot L}{\nu} = Re \quad \dots\dots\dots(1.18)$$

Perlu dijelaskan disini bahwa apabila gaya inersia dan gaya gesekan sama sama memegang peranan penting dalam permasalahan, maka rasio kedua gaya ini pada model dan prototip harus sama.

$$n_{Re} = n_U \cdot n_L \cdot n_\nu^{-1} = 1 \quad \dots\dots\dots(1.19)$$

Persyaratan ini disebut kriteria sebangun dinamik menurut kondisi bilangan reynold. Persyaratan ini sering juga disebut “scale condition”.

Bilangan Froude :

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{(g \cdot L)}} \text{ dengan skala bilangan Froude: } n_{Fr} = \frac{n_U}{(n_L)^{0,5}} \quad \dots\dots\dots(1.20)$$

Bilangan froude dapat diekspretasikan sebagai rasio antara gaya inersia dengan gaya gravitasi.

$$W = \rho \cdot g \cdot V$$

$$\frac{(\rho \cdot L^3) \left(\frac{U^2}{L}\right)}{\rho \cdot g \cdot L^3} = \frac{U^2}{g \cdot L} = Fr^2 \quad \dots\dots\dots(1.21)$$

Dengan demikian apabila gaya gravitasi dan gaya inersia sama sama memegang peranan penting dalam permasalahan, maka rasio kedua gaya tersebut pada model

dan prototip harus sama. Kriteria ini disebut kriteria sebangun menurut kondisi bilangan froude.

$$n_{Fr} = \frac{n_U}{n_L^{0,5}} = 1$$

Apabila gaya inersia, gaya gravitasi dan gaya gesek (kekentalan) sama sama penting dalam permasalahan, maka :

$$n_{Fr} = 1 \text{ sehinggaa} n_U = n_L^{0,5}$$

$$n_{Re} = 1 \text{ sehinggaa} n_U = n_L^{-1} \text{ (model dan prototip menggunakan zat cair yang sama).}$$

Kedua persamaan tersebut akan terpenuhi apabila $n_U = n_L = 1$, atau dengan kata lain besarnya model sama dengan prototip. Dari sini terlihat betapa mahalnya membuat suatu model apabila harus memenuhi kedua persyaratan tersebut.

Bilangan Weber :

Bilangan weber adalah rasio antara gaya inersia dan gaya tegangan muka.

$$\frac{(\rho.L^3) (\frac{U^2}{L})}{\sigma.L} = \frac{\rho . U . L}{\sigma} = W_e$$

Bilangan Cauchy

Bilangan cauchy adalah rasio antara gaya inersia dan gaya elastik.

$$\frac{(\rho.L^3) (\frac{U^2}{L})}{E.L^2} = \frac{\rho.U^2}{E} = C_a$$

.....(1.24)

Contoh.1.:

Dibangun model kesebangunan geometric dengan skala 5:1. Jika debit pada model adalah 0,2 m³/detik. Hitunglah debit pada prototype.

Jawab:

Rasio kecepatan antara protoyipe dan model adalah:

$$\frac{V_p}{V_m} = \frac{\frac{L_p}{T}}{\frac{L_m}{T}} = \frac{L_p}{L_m} = L_V = 5$$

Dalam kesebangunan geometrik, waktu pada model dan prototype adalah tanpa skala. Perbandingan luasan Antara model dan prototype adalah

$$\frac{A_p}{A_m} = \frac{L_p^2}{L_m^2} = L_V^2 = 25$$

Sehingga rasio debit adalah:

$$\frac{Q_p}{Q_m} = \frac{A_p \cdot V_p}{A_m \cdot V_m} = L_V^2 \cdot L_V = (25) \cdot (5) = 125$$

Sehingga diperoleh debit pada prototype adalah:

$$Q_p = 125 \cdot Q_m = 125 \cdot 0,2 = 25 \text{ m}^3/\text{det}$$

Contoh.2.:

Suatu model kapal dengan skala n=100. mengalami tahanan 0,01 kg (0,0981 N0, apabila kecepatan kapal pada ptototipe adalah 6 m/detik. Berapakah tahanan pada prototipe.

Jawab:

Karena akan dicari tahanan yang dapat dipresentasikan dalam bentuk gaya tekanan, maka digunakan angka Euler.

Angka Euler pada model dan prototype harus sama:

$$\left(\frac{V}{\sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}} \right)_p = \left(\frac{V}{\sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}} \right)_m$$

Zat cair yang digunakan pada prototype sama dengan yang digunakan pada model sehingga:

$$\rho_p = \rho_m$$

Angka Euler menjadi:

$$\left(\frac{V_p^2}{\Delta p_p} \right) = \left(\frac{V_m^2}{\Delta p_m} \right)$$

$$\frac{\Delta p_p}{\Delta p_m} = \left(\frac{V_p^2}{V_m^2} \right)$$

Karena gaya (F) adalah $\Delta p \cdot A$ maka:

$$\frac{F_p}{F_m} = \frac{\Delta p_p \cdot L_p^2}{\Delta p_m \cdot L_m^2} = \left(\frac{V_p^2 \cdot L_p^2}{V_m^2 \cdot L_m^2} \right) \dots \dots \dots (1)$$

Untuk model kippa yang bergerak pada muka air bebas, maka gaya grafitasi adalah dominan, sehingga analisis model menggunakan angka Froude pada model dan prototype adalah sama.

$\left(\frac{v}{\sqrt{g.L}}\right)_p = \left(\frac{v}{\sqrt{g.L}}\right)_m$ skala grafitasi adalah; $n_g = 1$
 sehingga:

$$\left(\frac{v}{\sqrt{L}}\right)_p = \left(\frac{v}{\sqrt{L}}\right)_m \text{ atau } \frac{v_p^2}{v_m^2} = \frac{L_p}{L_m} \dots\dots\dots(2)$$

Persamaan (2) disubstitusikan ke persamaan (1) diperoleh:

$$\frac{F_p}{F_m} = \frac{L_p^3}{L_m^3}$$

$$F_p = n_L^3 \cdot F_m$$

$$F_p = 1000^3 \cdot 0,01 = 10.000 \text{ kg. f (MKS) atau}$$

$$F_p = 100^3 \cdot 0,0981 = 98.100 \text{ N} = 98,1 \text{ kN (SI)}$$

Contoh.3.:

Sebuah pompa berkekuatan 59600 W (80 HP) digunakan pada sistem “power supply”. Modelnya untuk studi dibangun dengan skala 8:1. Jika rasio kecepatannya adalah 2:1. Hitunglah “power” yang dibutuhkan untuk model pompa tersebut.

Jawab:

Dari substitusi rasio panjang dalam rasio kecepatan diperoleh:

$$V_r = \frac{L_r}{T_r} = 2; \quad L_r = 8$$

$$T_r = \frac{L_r}{2} = \frac{8}{2} = 4$$

Pada model dan prototype digunakan zat cair yang sama sehingga $\rho_r = 1$, dan rasio gaya dapat dihitung :

$$F_r = \rho_r \cdot L_r^4 \cdot T_r^{-2} = \frac{(1) \cdot (8)^4}{(4)^2} = 256$$

Rasio dari tenaga adalah:

$$P_r = \frac{F_r \cdot L_r}{T_r} = \frac{(256)(8)}{(4)} = 512$$

Sehingga tenaga dibutuhkan untuk model pompa adalah:

$$P_m = \frac{P_p}{P_r} = \frac{59600}{512} = 116,6 \text{ W}$$

Contoh.4.:

Pesawat bergerak dengan kecepatan $V=650$ km/jam (180,6 m/det) melalui udara diam pada suhu 20^0 Celsius. Apabila tegangan elastis dan rapat massa udara adalah ($E=21 \text{ kg/cm}^2=21 \cdot 10^4 \cdot \text{kg/m}^2$), dan ($\rho=0,126 \text{ kg/m}^3$). Hitung angka Mach.

Jawab:

Angka Mach:

$$M_a = \frac{V}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}} = \frac{180,6}{\sqrt{\frac{21 \cdot 10^4}{0,126}}} = 0,14$$

Contoh.5.:

Model bangunan pelimpah dibangun dengan skala $n = \frac{L_p}{L_m} = 30$. Prototipe mempunyai tinggi 15 m dan tinggi peluapan 1,5 m.

- Berapa tinggi model dan tinggi peluapan pada model
- Jika debit aliran pada model adalah 12 liter/detik, berapakah debit aliran pada prototipe.
- Jika kecepatan aliran pada model adalah 0,66 m/detik, berapakah kecepatan aliran pada prototipe.

Jawab:

$$\text{Skala model } n = \frac{L_p}{L_m} = 30$$

a. Tinggi bangunan dan tinggi peluapan pada model:

$$n = \frac{L_p}{L_m} = 30; L_m = \frac{L_p}{30} = \frac{15}{30} = 0,50 \text{ m} = 50 \text{ cm}$$

$$n = \frac{h_p}{h_m} = 30; h_m = \frac{h_p}{30} = \frac{1,5}{30} = 0,050 \text{ m} = 5,0 \text{ cm}$$

b. Debit aliran pada prototype jika debit aliran pada model 12 liter/detik

$$Q = A \cdot V; \text{ dalam bentuk skala } n_Q = n_A \cdot n_V$$

$$n_Q = n_L^2 \cdot n_{L^{1/2}} = n_L^{5/2}$$

$$\frac{Q_p}{Q_m} = 30^{5/2} = 4929,5; Q_p = 4929,5 \text{ (12)}$$

$$= 59,154 \text{ m}^3/\text{det}$$

c. Kecepatan pada prototype jika kecepatan pada model 0,66 m/det.

Untuk memenuhi kesamaan dinamis, maka angka Fr pada model dan prototype harus sama.

$$n_{Fr} = \frac{Fr_p}{Fr_m} = 1$$

$$\left(\frac{V}{\sqrt{g \cdot h}} \right)_p = \left(\frac{V}{\sqrt{g \cdot h}} \right)_m$$

$$\left(\frac{V_p}{V_m} \right) = \left(\frac{g_p}{g_m} \times \frac{h_p}{h_m} \right)^{1/2};$$

$$n_V = n_g^{1/2} \cdot n_h^{1/2}; n_g = 1; n_V = n_h^{1/2}; n_V = n_L^{1/2}$$

$$n_V = n_L^{1/2} = (30)^{1/2} = 5,4772$$

$$\frac{V_p}{V_m} = 5,4772$$

$$V_p = 5,4772 \cdot (0,66) = 3,615 \frac{\text{m}}{\text{detik}}$$

BAB II. ILMU PENDUKUNG MODEL HIDRAULIK

II.1. Analisis Dimensi

Untuk menuliskan dimensi dari variabel yang terdapat pada bidang teknik hidraulik biasanya dipergunakan sistem MLT yaitu penulisan dimensi dengan menggunakan 3 elemen pokok dimensi Massa (M), panjang (L) dan Waktu (T) . Tabel 2.1 menunjukkan tabel dimensi dari berbagai variabel yang biasa digunakan dalam analisis dimensi.

Tabel II.1 Dimensi berbagai variabel di Teknik Hidraulik

| No | Variabel/Parameter | Simbol | Dimensi |
|----|-----------------------|------------|------------------------------------|
| 1 | Panjang | L | L |
| 2 | Waktu | T, t | T |
| 3 | Massa | M | M |
| 4 | Luas | A | L ² |
| 5 | Volume | V | L ³ |
| 6 | Kecepatan linear | U, V, u, v | L/T |
| 7 | Kecepatan sudut, | w, f | 1/T |
| 8 | frekuensi | a | L/T ² |
| 9 | Percepatan linear | - | 1/T ² |
| 10 | Percepatan sudut | Q | L ³ /T |
| 11 | Debit | q | L ² /T |
| 12 | Debit persatuan lebar | v | L ² /T |
| 13 | Viskositas kinematic | F | ML/T ² |
| 14 | Gaya | ρ | M/L ³ |
| 15 | Rapat massa | w, γ | M/(L ² T ²) |
| 16 | Berat unit | p, τ | M/(L/T ²) |
| 17 | Tekanan, Tegangan | E | ML ² /T ² |

| | | | |
|----|------------------------|----------|------------|
| 18 | gesek | E' | L^2/T^2 |
| 19 | Energi | H | L |
| 20 | Energi persatuan massa | m | ML/T |
| 21 | Energi persatuan berat | p | ML^2/T^3 |
| 22 | Momentum | μ | M/LT |
| 23 | Tenaga | σ | M/T^2 |
| 24 | Viskositas dinamik | k | M/LT^2 |
| | Tegangan permukaan | | |
| | Modulus Bulk | | |

Dalam pembuatan model biasanya dilakukan pengecilan dari berbagai variabel tersebut, yaitu dengan memberikan skala (n) pada masing-masing variabel tersebut. Sedangkan skala dari berbagai variabel atau parameter tersebut dapat ditentukan berdasarkan hubungan antara parameter yang di ekspresikan dalam bilangan tak berdimensi, misalnya bilangan reynlod, bilangan Froude dan sebagainya. Selain untuk menentukan hubungan antara skala, bilangan tak berdimensi ini dapat pula dipergunakan untuk menggambarkan hasil-hasil penelitian, dengan demikian hasil dari penelitian tersebut dapat digeneralisir. Untuk menentukan bilangan tak berdimensi tersebut dapat dilakukan dengan analisis dimensi. Analisis dimensi untuk menentukan bilangan tak berdimensi tersebut ada beberapa cara diantaranya adalah dengan cara :

- a. Basic echelon matrix
- b. Buckingham (phi.theorem)
- c. Rayleigh
- d. Stepwise, dan
- e. Langhaar

a. Cara Basic Echolen Matrix

Prinsip penentuan bilangan tak berdimensi dengan cara “basic echelon matrix” adalah dengan memilih “repeating variable” dengan jumlah sesuai elemen pokok (dimensi) yang dipergunakan (misalnya tiga buah untuk dimensi yang dipakai pada persoalan tersebut yaitu L, T, dan M) dan variable sisanya disusun dengan menggunakan “repeating variable” tersebut. Cara penyusunannya menggunakan urutan tingkatan (echelon) dan matrix “repeating variable”. Untuk jelasnya penyusunan bilangan tak berdimensi ini dapat dilihat pada contoh dibawah ini.

Contoh : penelitian tentang gaya yang diperlukan untuk menarik kapal di suatu laboratorium. Variabel yang diamati pada penelitian tersebut adalah :

$$F, d, V, \rho, g, \mu, \sigma$$

Carilah parameter tak berdimensi untuk keperluan penelitian tersebut.

Jawab:

| | | d | V | ρ | F | g | μ | σ |
|------------|----------------|---|----|--------|----|----|-------|----------|
| | L | 1 | 1 | -3 | 1 | 1 | -1 | 0 |
| | T | 0 | -1 | 0 | -2 | -2 | -1 | -2 |
| | M | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| [d] | L | 1 | 0 | 0 | 2 | -1 | 1 | 1 |
| [V] | $T^{-1} L$ | 0 | 1 | 0 | 2 | 2 | 1 | 2 |
| [ρ] | $M T^0 L^{-3}$ | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |

← echelon → ← matrix →

$$\text{Perhitungan : } F = \frac{L M}{T^2} = \left(\frac{M}{L^3}\right) \frac{L^4}{T^2} = (\rho) \left(\frac{L^2}{T^2}\right) L^2 = \int 1 V^2 d^2$$

$$\rightarrow d = 2, V = 2, \rho = 1$$

$$g = \frac{L}{T^2} \quad \rightarrow d = -1, V = 2, \rho = 0$$

$$\mu = \frac{M}{LT} \quad \rightarrow d = 1, V = 1, \rho = 1$$

$$\sigma = \frac{M}{T^2} \quad \rightarrow d = 1, V = 2, \rho = 1$$

Bilangan tak berdimensi:

$$\Phi \left(\frac{F}{d^2 \cdot V^2 \cdot \rho}, \frac{g}{d^{-1} \cdot V^2}, \frac{\mu}{d \cdot V \cdot \rho}, \frac{\sigma}{d \cdot V^2 \cdot \rho} \right) = 0$$

b. Cara Buckingham (phi theorem)

Jika suatu kejadian atau fenomena dapat dijelaskan dengan n parameter, dan parameter tersebut tersusun oleh m elemen pokok (dimensi), maka jumlah produk bilangan tak berdimensi yang dapat dihasilkan atau diturunkan adalah (n-m). Dengan menentukan “repeating variable” sejumlah

dengan elemen pokok (dimensi) maka masing-masing produk bilangan tak berdimensi tersebut dapat disusun dan dianalisis untuk mendapatkan besarnya.

Contoh :

Aliran air melalui V notch dapat dituliskan sbb :

$$Q = f(g, H, B, \mu, \rho)$$

Dari persamaan tersebut terlihat ada 6 variabel dan 3 elemen pokok (panjang-L, waktu-T, dan massa-M). Dengan demikian dari permasalahan ini dapat diturunkan 3 (tiga) produk bilangan tak berdimensi : π_1 , π_2 , dan π_3 .

$$\pi_1 = \mu^a \cdot \rho^b \cdot g^c \cdot H$$

$$[M L T]^{-1} = \left(\frac{M}{L T}\right)^a \left(\frac{M}{L^3}\right)^b \left(\frac{L}{T^2}\right)^c L^1$$

$$M \longrightarrow a + b = 0$$

$$L \longrightarrow -a - 3b + c + 1 = 0 \longrightarrow$$

$$a = -2/3$$

$$T \longrightarrow -a - 2c = 0$$

$$b = 2/3$$

$$c = 1/3$$

$$\mu^1 = \mu^{-2/3} \cdot \rho^{2/3} \cdot g^{1/3} \cdot H =$$

$$\frac{\rho^2 g H^3}{\mu^2}$$

$$\pi_2 = \mu^a \cdot \rho^b \cdot g^c \cdot B \quad ; \text{ atau } \pi_2 = \frac{\rho^2 g B^3}{\mu^2}$$

$$\pi_3 = \mu^a \cdot \rho^b \cdot g^c \cdot Q$$

$$[M L T]^{-1} = \left(\frac{M}{L T}\right)^a \left(\frac{M}{L^3}\right)^b \left(\frac{L}{T^2}\right)^c \left(\frac{L^3}{T}\right)$$

$$M \quad \longrightarrow \quad a + b = 0$$

$$L \quad \longrightarrow \quad -a - 3b + c + 1 = 0 \quad ; \text{ maka}$$

$$a = -5/3$$

$$T \quad \longrightarrow \quad -a - 2c = 0$$

$$b = 5/3$$

$$c = 1/3$$

$$\pi_3 = \mu^{-5/3} \cdot \rho^{5/3} \cdot g^{1/3} \cdot Q = \frac{\rho^5 g Q^3}{\mu^5}$$

$$\text{sehingga: } \quad \Phi \left(\frac{\rho^2 g H^3}{\mu^2}, \frac{\rho^2 g B^3}{\mu^2}, \frac{\rho^5 g Q^3}{\mu^5} \right)$$

Catatan : 1. Usahakan parameter parameter penting hanya muncul sekali

2. Usahakan repeating variabel yang dipilih mempunyai dimensi lengkap

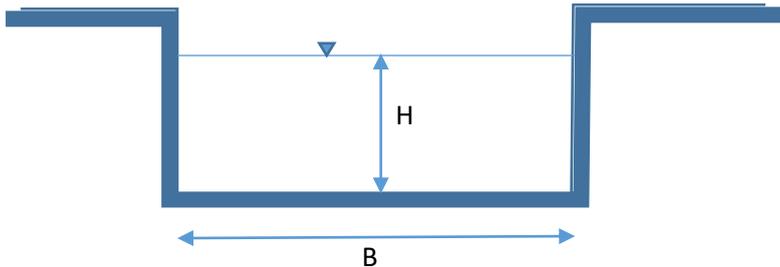
(L, T, M).

c. Cara Rayleigh

Cara ini biasanya digunakan untuk permasalahan yang relatif sederhana. Bilangan tak berdimensi langsung diturunkan dari hubungan parameter yang ada. Apabila cara ini diterapkan pada permasalahan yang kompleks dan dengan jumlah parameter yang banyak maka akan mengalami kesulitan.

Contoh :

Penentuan bilangan tak berdimensi pada masalah pelimpahan air lewat peluap segiempat.



$$Q = f(g, H, B)$$

$$Q = k [g]^a [H]^b [B]^c$$

$$\frac{L^3}{T} = \left(\frac{L}{T^2}\right)^a (L)^b (L)^c$$

$$Q = k g^{0,5} H^{2,5-c} B^c$$

$$= k g^{0,5} H^{2,5-c} \left(\frac{B}{H}\right)^c$$

sehingga: $3 = a + b + c$

$$-1 = -2a$$

$$a = 0,5$$

$$b = 2,5 - c$$

$$\frac{Q}{g^{0,5}H^{2,5}} = \Phi\left(\frac{B}{H}\right)$$

$$\text{Sehingga ; } \Phi\left(\frac{Q}{g^{0,5}H^{2,5}}, \frac{B}{H}\right) = 0$$

d. Cara Stepwise (Stepwise Procedure)

Metode stepwise adalah cara untuk mendapatkan bilangan tak berdimensi dengan penidaan (eleminasi) dimensi tahap demi tahap. Tahap pertama adalah penidaan dimensi massa (M) dengan menggunakan variabel yang mengandung dimensi massa misalnya rapat massa ρ (M/L³). Tahap berikutnya adalah penidaan dimensi waktu (T) dengan menggunakan variabel yang mengandung dimensi waktu misalnya kecepatan V (L/T). Tahap terakhir adalah penidaan dimensi panjang L dengan menggunakan variabel yang “hanya” mengandung dimensi panjang misalnya dengan kedalaman d (L). Ada dua cara stepwise yaitu :

- a. “Basic stepwise procedure” dan
- b. “ Dimensional matrix stepwise”.

Kedua cara ini mempunyai prinsip yang sama, hanya bedanya pada penyusunan urutan variabel yang akan dianalisis. Pada cara pertama urutan variabel adalah bebas,

sedangkan pada cara kedua urutan variabel disusun sedemikian rupa sehingga “repeating variabel membentuk matrik” pada awal dari susunan variabel (lihat contoh).

1). Basic stepwise procedure

Contoh : Suatu penelitian tentang gaya yang bekerja pada kapal yang sedang berada di pintu air (waterlock). $F = f(\rho, V, d, g, \mu, \sigma)$

Pertanyaan : Carilah produk bilangan tak berdimensi dari permasalahan tersebut.

Penyelesaian :

| | F | ρ | v | d | g | μ | σ |
|----------------|------------------|---------|-------|---|---------|--------------|------------------|
| MLT | ML/T^2 | M/L^3 | L/T | L | L/T^2 | M/LT | M/T^2 |
| $\rho (M/L^3)$ | F/ρ | 1 | v | d | g | μ/ρ | μ/ρ |
| LT | L^4/T^2 | | L/T | L | L/T^2 | L^2/T | L^3/T^2 |
| $V (L/T)$ | $F/\rho v^2$ | | 1 | d | g/v^2 | $\mu/\rho v$ | $\mu/\rho v^2$ |
| L | L^2 | | | L | $1/L$ | L | L |
| $d(L)$ | $F/\rho v^2 d^2$ | | | | 1 | gd/v^2 | $\mu/\rho v^2 d$ |
| | 1 | | | | | 1 | 1 |

Sehingga; $\emptyset \left(\frac{F}{\rho v^2 d^2}, \frac{g d}{v^2}, \frac{\mu}{\rho v d}, \frac{\sigma}{\rho v^2 d} \right) = 0$

2). Dimensional matrix stepwise

Contoh : Suatu penelitian tentang gaya yang bekerja pada kapal yang sedang berada di pintu air (waterlock).

$$F = f(\rho, V, d, g, \mu, \sigma)$$

Pertanyaan : Carilah produk bilangan tak berdimensi dari permasalahan tersebut

Penyelesaian :

| d | v | ρ | F | g | μ | σ |
|---|---|--------|----|----|-------|----------|
| L | 1 | 1 | -3 | 1 | 1 | -1 |
| T | 0 | -1 | 0 | -2 | -2 | -1 |
| M | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |

$\rho(M/L^3)$

| d | v | - | F/ρ | g | μ/ρ | σ/ρ |
|---|---|----|----------|----|------------|---------------|
| L | 1 | 1 | 4 | 1 | 2 | 3 |
| T | 0 | -1 | -2 | -2 | -1 | -2 |

$V(L/T)$

| d | - | - | F/v^2 | ρ | g/v^2 | $\mu/v\rho$ | $\sigma/v^2\rho$ |
|---|---|---|---------|--------|---------|-------------|------------------|
| L | 1 | | 2 | -1 | 1 | 1 | |

$d(L)$

| - | - | - | $F/v^2 d^2$ | ρ | gd/v^2 | $\mu/vd\rho$ | $\sigma/v^2 d\rho$ |
|---|---|---|-------------|--------|----------|--------------|--------------------|
| | | | | | | | |

Sehingga: $\emptyset \left(\frac{F}{\rho v^2 d^2}, \frac{gd}{v^2}, \frac{\mu}{\rho v d}, \frac{\sigma}{\rho v^2 d} \right) = 0$

e. Cara Langhaar

Jika fenomena/kejadian hidraulik dapat dijelaskan dengan n parameter Pi dengani = 1,

2, 3, , n dan jika parameter tersebut tersusun oleh m elemen pokok, maka produk bilangan tak berdimensi yang dapat diturunkan sejumlah (n-m). Untuk keperluan teknik hidraulik biasanya ada 3 elemen pokok yaitu : massa (M), panjang (L), dan waktu (T).

$$\pi_j = P_1^{k_1} \cdot P_2^{k_2} \cdot P_3^{k_3} \cdot \dots \cdot P_n^{k_n},$$

dimana π_j = produk bilangan tak berdimensi dengan $j = 1, 2, 3$

Jika P_i mempunyai dimensi $M^{\alpha_i} L^{\beta_i} T^{\tau_i}$ maka dimensi dapat ditulis sebagai berikut :

$$\pi = (M^{\alpha_1} L^{\beta_1} T^{\tau_1})^{k_1} * (M^{\alpha_2} L^{\beta_2} T^{\tau_2})^{k_2} * \dots * (M^{\alpha_n} L^{\beta_n} T^{\tau_n})^{k_n}$$

$$\pi = [M^{(\alpha_1 k_1 + \alpha_2 k_2 + \dots + \alpha_n k_n)}] * [L^{(\beta_1 k_1 + \beta_2 k_2 + \dots + \beta_n k_n)}] * [T^{(\tau_1 k_1 + \tau_2 k_2 + \dots + \tau_n k_n)}]$$

π merupakan bilangan tak berdimensi jika :

$$\alpha_1 k_1 + \alpha_2 k_2 + \dots + \alpha_n k_n = 0$$

$$\beta_1 k_1 + \beta_2 k_2 + \dots + \beta_n k_n = 0$$

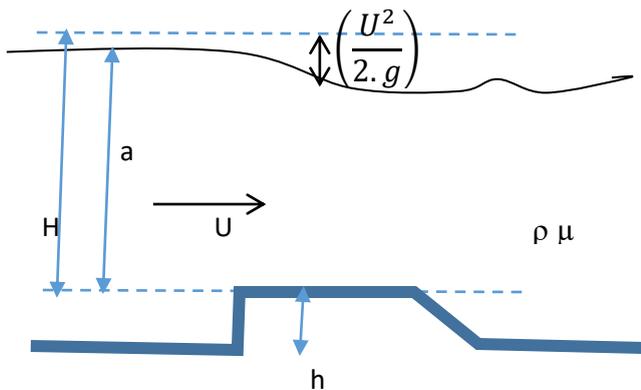
$$\gamma_1 k_1 + \gamma_2 k_2 + \dots + \gamma_n k_n = 0$$

Koefisien α_i , β_i , dan τ_i dapat diketahui dari parameter P_i yang terkait.

Contoh :

Suatu aliran melalui ambang dengan ketinggian h . Tinggi peluap a dan kecepatan air diatas ambang U . Air mempunyai rapat massa ρ dan kekentalan μ (lihat gambar). Carilah bilangan tak berdimensi dari permasalahan ini.

Penyelesaian :



Jawab :

Pengelompokan parameter :

1. Parameter tak bebas (dependent parameter) H
2. Parameter yang diubah selama percobaan : a, U, ρ, h

3. Parameter lain g, μ

Penentuan harga $\alpha_i, \beta_i,$ dan γ_i secara tabulasi.

| Group | 1 | 2 | 3 |
|-------|---|---|---|
| ----- | | | |

----- Keterangan

Parameter H a U ρ h g μ

| | | | | | | | |
|---|---|---|----|----|---|----|--------------------|
| M | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 < --- α_i |
| L | 1 | 1 | 1 | -3 | 1 | 1 | -1 < --- β_i |
| T | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | -2 | -1 < --- τ_i |

k1 k2 k3 k4 k5 k6 k7 < --- k_i

$$k_4 + k_7 = 0$$

$$k_1 + k_2 + k_3 - 3k_4 + k_5 + k_6 - k_7 = 0$$

$$-k_3 - 2k_6 - k_7 = 0$$

Eliminasi $k_5, k_6,$ dan k_7 :

$$k_5 = -k_1 - k_2 - 0,5k_3 + 1,5k_4$$

$$k_6 = -0,5k_3 + 0,5k_4$$

$$k_7 = -k_4$$

Penentuan bilangan tak berdimensi

| ki | k1 | k2 | k3 | k4 | k5 | k6 | k7 |
|------------------|----|----|----|--------|------|------|-------|
| ----- Keterangan | | | | | | | |
| Parameter | H | a | u | ρ | h | g | μ |
| π_1 | 1 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 |
| π_2 | 0 | 1 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 |
| π_3 | 0 | 0 | 1 | 0 | -0,5 | -0,5 | 0 |
| π_4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1,5 | 0,5 | -1 |

$$\pi_1 = \frac{H}{h}$$

$$\pi_3 = \frac{U}{\sqrt{(g \cdot h)}}$$

$$\pi_2 = \frac{a}{h}$$

$$\pi_4 = \rho g^{0,5} \mu^{-1} h^{1,5}$$

Keempat produk bilangan tak berdimensi tersebut dapat dipergunakan untuk membuat bilangan tak berdimensi yang lain, misalnya :

$$\pi_5 = \pi_3 * \pi_2^{0,5} = U / (g a)^{0,5} = Fr$$

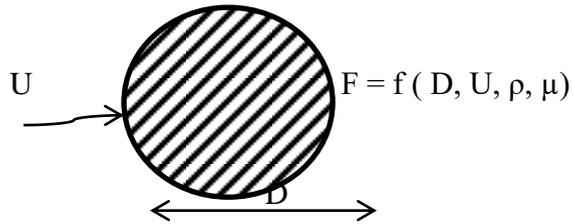
$$\pi_6 = \pi_4 * \pi_3 * \pi_2 = U a / \nu = Re$$

Dengan demikian untuk menentukan skala dapat didasarkan pada nilai π sebagai berikut:

- 1) . π_1 dan π_2 , adalahsebangun geometrik
- 2) . π_5 adalah bilangan Froude
sebangun }
}
- 3) . π_6 adalah bilangan Reynolds
dinamik

Dalam penentuan skala dapat pula menggunakan π_1, π_2, π_3 dan π_4 .

Contoh :



- Carilah produk bilangan tak berdimensi dari permasalahan tersebut.
- Berilah rumus gaya yang disebabkan oleh aliran dan berilah komentar.

Jawab :

a). Diselesaikan dengan cara Langhaar :

| | F | D | U | ρ | μ | |
|------------|----|----|----|--------|-------|------------|
| Keterangan | | | | | | |
| M | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | α_i |
| L | 1 | 1 | 1 | -3 | -1 | β_i |
| T | -2 | 0 | -1 | 0 | -1 | τ_1 |
| ----- | | | | | | |
| | k1 | k2 | k3 | k4 | k5 | |

$$k_1 + k_4 + k_5 = 0$$

$$k_1 + k_2 + k_3 - 3k_4 - k_5 = 0$$

$$-2 k_1 \quad - k_3 \quad - k_5 = 0$$

Eliminasi k3, k4, dan k5 :

$$k_3 = k_2$$

$$k_6 = k_1 + k_2$$

$$k_7 = -2 k_1 - k_2$$

Perhitungan bilangan tak berdimensi:

| k1 | k1 | k2 | k3 | k4 | k5 |
|-----------|----|----|----|--------|-------|
| parameter | F | D | U | ρ | μ |
| π_1 | 1 | 0 | 0 | 1 | -2 |
| π_2 | 0 | 1 | 1 | 1 | -1 |

$$\pi_1 = \frac{F \cdot \rho}{\mu^{-2}}; \quad \pi_2 = \frac{D \cdot U \cdot \rho}{\mu} = R_e$$

b). Diselesaikan dengan cara Rayleigh

$$F = C_d \cdot D^{k_1} \cdot U^{k_2} \cdot \rho^{k_3} \cdot \mu^{k_4}$$

$$[M \cdot L \cdot T^{-2}] = [L]^{k_1} [L \cdot T^{-1}]^{k_2} [M \cdot L^{-3}]^{k_3} [M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}]^{k_4}$$

$$M \text{ ---- } > 1 = k_3 + k_4$$

$$L \text{ ---- } > 1 = k_1 + k_2 - 3k_3 - k_4$$

$$T \text{ ---- } > -2 = -k_2 - k_4$$

Penentuan harga k1, k2, dan k3 :

$$k_1 = 2 - k_4$$

$$k_2 = 2 - k_4$$

$$k_3 = 1 - k_4$$

Penentuan rumus

$$F = C_d * D^{(2 - k_4)} * U^{(2 - k_4)} * \rho^{(1 - k_4)} * \mu^{k_4}$$

$$F = C_d * D^2 * U^2 * \rho * \left(\frac{\mu}{D \cdot \rho \cdot U}\right)^{k_4} \approx C_d * \left(\frac{1}{Re}\right)^{k_4} * D^2 * U^2 * \rho$$

$$F = C_d * D^2 * U^2 * \rho$$

Catatan : a). $C_d' = f(Re)$

b). Untuk aliran turbulen sempurna C_d tidak terpengaruh oleh variasi Re

c). Rumus tersebut diatas dapat langsung diturunkan dari penyusunan bilangan tak berdimensi pada penyelesaian (a).

Produk bilangan tak berdimensi ini diusahakan agar didapat dengan penyusunan secara grouping, hal ini agar parameter penting hanya muncul sekali dalam produk bilangan tak berdimensi. Hal ini penting sekali untuk menghindari hubungan yang palsu ("*spurius*"). Hubungan *spurius* yaitu hubungan yang kalau digambarkan kelihatannya bagus namun kenyataannya membingungkan.

Contoh hubungan palsu :

Pada suatu percobaan mengenai model saluran alluvial dengan kekasaran dasar yang ditunjukkan dengan nilai Chezy (C). Apabila saluran tersebut dengan lebar konstant, nilai C diukur dalam berbagai kondisi kecepatan aliran.

Pertanyaannya adalah bagaimanakah menggambarkan data yang didapatkan tersebut. Kelihatannya adalah logik dengan menggambarkan dalam bentuk grafik hubungan antara C/\sqrt{g} dengan $Fr = u/\sqrt{(g a)}$. Dan hal ini kemungkinan besar akan memberikan hubungan yang bagus antara $C/\sqrt{g} \approx Fr$, hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut ini.

$$U = C (a i)^{0,5}$$

$$U/\sqrt{(g a)}^{0,5} = i^{0,5} C/\sqrt{g}^{0,5}$$

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = Fr \cdot i^{0,5}$$

Model diukur nilai C nya dengan berbagai variasi aliran dengan landai tetap. Dengan demikian $\frac{C}{\sqrt{g}}$ proporsional dengan Fr . Dari hubungan ini terlihat se-akan- akan $\frac{C}{\sqrt{g}}$ yang tidak memenuhi persamaan ini mempunyai harga C yang salah.

II.2. Statistik

Model hidraulik biasanya dipergunakan untuk penelitian. Hasil dari penelitian ini didapatkan dari pengukuran. Dan pengukuran ini dapat mempunyai dua macam kesalahan yaitu :

- a). Kesalahan sistematis (“*systematic errors*”)
- b). Kesalahan stokastik (“*stochastical errors*”).

Kesalahan sistematis dapat diperkecil dengan cara melakukan kalibrasi peralatan sebelum digunakan (lihat sub bab 2.3). Sedangkan kesalahan stokastik besarnya sangat tergantung dengan peralatan yang dipakai. Kesalahan

biasanya diwujudkan dalam bentuk prosentase (%) dari hasil pengukuran. Untuk mengurangi kesalahan ini perlu dilakukan pemilihan alat atau instrumentasi yang sesuai atau tepat pada percobaan yang sedang dilakukan. Dalam menganalisis perambatan kesalahan pada suatu peralatan ke hasil penelitian dapat dilakukan analisis statistik yaitu menggunakan metode “*quadratic error propagation*”.

$z = f(x,y)$ dimana; $x, y =$ “*stochastic independent variable*” dan terdistribusi normal

$$\sigma_z^2 = \sigma_x^2 \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \sigma_y^2 \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2$$

.....
..... (2.1)

Misalkan percobaan yang diteliti adalah hubungan antara variabel $z, x,$ dan y sebagai berikut ini :

$$z = a \cdot (x)^b \cdot (y)^c$$

$$\sigma_z^2 = \sigma_x^2 \cdot (a \cdot b \cdot x^{b-1} \cdot y^c)^2 + \sigma_y^2 \cdot (a \cdot c \cdot x^b \cdot y^{c-1})^2$$

.....(2.2)

Dibagi dengan z^2

$$\left(\frac{\sigma_z}{z}\right)^2 = b^2 \cdot \left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + c^2 \cdot \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2$$

$$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} r_z = \frac{\sigma_z}{z}$$

$$r_x = \frac{\sigma_x}{x} (r_z)^2 = b^2 \cdot (r_x)^2 + c^2 \cdot (r_y)^2 \dots\dots\dots(2.3)$$

$$r_y = \frac{\sigma_y}{y}$$

Dari persamaan ini dapat ditentukan ketelitian z apabila kesalahan relatif x dan y diketahui.

Contoh :

1. Penelitian koefisien C_D pada benda yang berada dialiran air.

$$F = C_D \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A$$

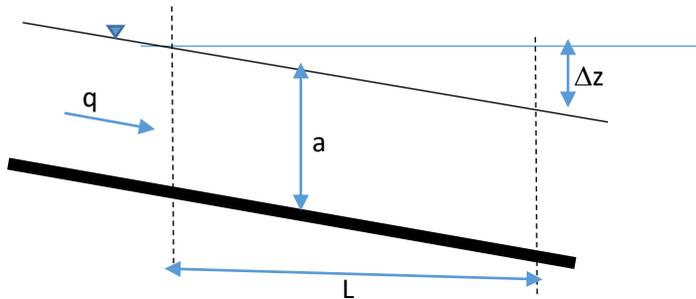
$$C_D = \frac{2 \cdot F}{\rho \cdot U^2 \cdot A}$$

Apabila ρ dan A dianggap tidak terdapat kesalahan dalam pengukuran (dan kedua parameter tersebut mempunyai nilai konstan selama percobaan berlangsung), maka kesalahan relatif yang terjadi pada C_D dapat ditentukan sebagai berikut :

$$(r_{C_D})^2 = 4 \cdot (r_U)^2 + (r_F)^2$$

$$r_{C_D} = \sqrt{4 \cdot (r_U)^2 + (r_F)^2}$$

2. Penelitian kekasaran (koefisien Chezy, C) pada saluran terbuka.



$$q = U * a$$

$$U = C * (a * i)^{0,5} = C * (a * \Delta z / L)^{0,5}$$

$$q = C * a^{1,5} * (\Delta z / L)^{0,5}$$

$$C = q * a^{-1,5} * \Delta z^{-0,5} * L^{0,5}$$

$$(r_c)^2 = (r_q)^2 + (9/4) * (r_a)^2 + (1/4) * (r_{\Delta z})^2 + (1/4) * (r_L)^2$$

3. Penelitian pengaliran melalui lubang.

$$Q = k * D^2 * \sqrt{\Delta H * g}$$

Penjelasan :

Q = debit yang mengalir melalui lubang

k = koefisien debit

D = diameter lubang

ΔH = perbedaan tinggi

g = percepatan gravitasi

Q diukur dengan kesalahan relatif 1 % ,

D diukur dengan kesalahan relatif 0,4 % , dan

ΔH diukur dengan kesalahan relatif 1 % ; hitunglah kesalahan yang mungkin terjadi pada k (r_k) ?

Jawab:

$$r_Q = 1 \%$$

$$r_D = 0,4 \%$$

$$r_{\Delta H} = 1 \%$$

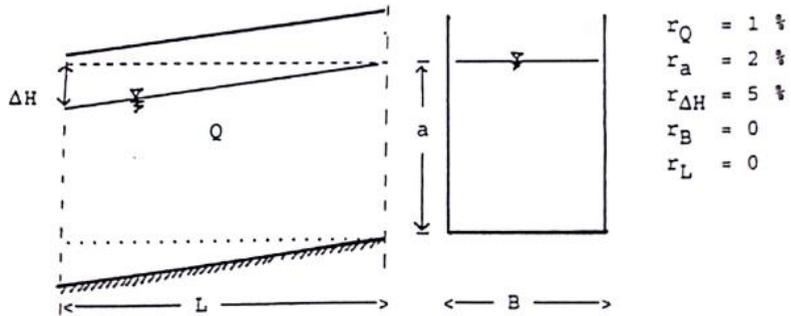
sehingga :

$$(r_k)^2 = (r_Q)^2 + 4 * (r_D)^2 + \left(\frac{1}{4}\right) * (r_{\Delta H})^2$$

$$= 10^{-4} * (1 + 4 * 0,16 + 0,25) = 1,89 * 10^{-4}$$

$$(r_k)^2 = \sqrt{(1,89 * 10^{-4})} = 1,375 \%$$

4. Diketahui :



Ditanyakan :

- a. Berapakah r_{ks} , apabila $U = 25 * \left(\frac{a}{ks}\right)^{\frac{1}{6}} * \left(a * \frac{\Delta H}{L}\right)^{\frac{1}{2}}$;

$$U = C \sqrt{(a i)}. \text{ dan apakah kesimpulan}$$

saudara?

- b. Bagaimana memperbaiki keadaan model tersebut?

Jawab :

a. $Q = B * a * U = B * a * 25 * \left(\frac{a}{ks}\right)^{\frac{1}{6}} * \left(a * \frac{\Delta H}{L}\right)^{\frac{1}{2}}$

$$Q^6 = B^6 * a^6 * 25^6 * \left(\frac{a}{ks}\right) * a^3 * \Delta H^3 * L^{-3}$$

$$ks = Q^{-6} * a^{10} * B^6 * \Delta H^3 * L^{-3} * 25^6$$

$$(r_{ks})^2 = 36 * (r_Q)^2 * 100 * (r_a)^2 + 36 * (r_B)^2 + 9 * (r_{\Delta H})^2 + 9 * (r_L)^2$$

$$= 10^{-4} * (36 + 400 + 0 + 225 + 0) = 661 * 10^{-4}$$

$$r_{ks} = 0,257 = 25,7 \%$$

Komentar : untuk penelitian kekasaran dasar (*bed-roughness*) model ini kurang teeliti. Perlu

dilakukan perbaikan atau peningkatan ketelitian alat ukur yang dipergunakan

model.

- b. Perbaikan dilakukan dengan peningkatan ketelitian alat ukur misalnya alat yang dipakai untuk mengukur ΔH dan a :

$$r_a = 0,5 \%$$

$$r_{\Delta H} = 2 \%$$

$$(r_{ks})^2 = 10^{-4} * (36 + 25 + 0 + 36 + 0)$$

$$= 97 * 10^{-4}$$

$$r_{ks} = 9,85 \%, \text{ adalah Ok}$$

II.3. Instrumentasi dan Sistem Kontrol

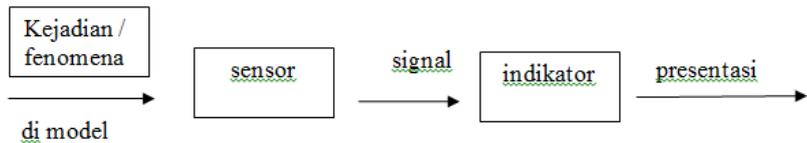
Untuk mendapatkan informasi dari suatu penelitian atau eksperimen yang dilakukan dengan model hidraulik dibutuhkan suatu alat atau instrumentasi. Keberhasilan penelitian dengan model hidraulik sangat tergantung pada ketelitian alat yang dipakai dalam pengumpulan informasi dari model. Disamping alat ukur yang baik, penelitian dengan menggunakan model juga menuntut beberapa persyaratan kondisi batas (“*boundary condition*”) yang tepat, misalnya hal-hal menyangkut kondisi mengenai : debit, elevasi air, spektrum gelombang yang akan dipergunakan di model. Untuk menciptakan agar supaya kondisi model sesuai dengan yang ada di prototip maka diperlukan sistem kontrol yang tepat.

Didalam penelitian model hidraulik berbagai parameter harus diukur dan dikontrol, diantaranya adalah :

- a. elevasi air,
- b. debit dan kecepatan,
- c. tekanan dan gaya yang bekerja pada suatu model,
- d. konsentrasi larutan garam atau kandungan lumpur,
- e. temperatur,
- f. gelombang,
- g. gerakan sedimen, pengatur sedimen, dan sebagainya,
- h. kedalaman gerusan.

Proses untuk mendapatkan informasi atau data dari model dapat dijelaskan melalui gambar 2.1 . Kejadian yang terdapat di model diukur dengan suatu alat atau sensor (misalnya “*wave probe*”), dan dari alat ini signal dikirim ke

indikator (misalnya “*wave recorder*”) untuk dipresentasikan di layar monitor atau dalam bentuk grafik pada kertas pencatat. Data ini merupakan informasi yang sangat penting dari model dan untuk keperluan penelitian dapat dianalisa lebih lanjut.



Gambar II.1 Proses untuk mendapatkan informasi dari model

Di sepanjang proses untuk mendapatkan informasi tersebut dapat timbul suatu penyimpangan atau kesalahan (baik sistematis ataupun stokastik). Kesalahan sistematis selama proses tersebut dapat dihindari atau dikurangi dengan melakukan kalibrasi alat yang akan dipakai. Sedangkan kesalahan stokastik dapat dihindari atau dikurangi dengan jalan pemilihan alat dan skala model yang tepat. Perlu ditekankan disini bahwa kesaksamaan studi atau penelitian model hidraulik sangat ditentukan oleh:

- 1) kesaksamaan data lapangan (prototip),
- 2) kesaksamaan sistem kontrol, dan
- 3) kesaksamaan sistem pengukuran.

Pembuatan model dengan data lapangan (prototip) yang tidak sudah dapat dipastikan hasilnya tidak akan memuaskan. Karena model yang dibuat tidak akan mencerminkan keadaan lapangan yang sebenarnya. Demikian pula suatu model apabila tidak dilengkapi sistem kontrol yang baik, akan

mengalami kesulitan dalam menyesuaikan agar supaya kondisi model menyerupai atau sebangun dengan prototip.

Untuk melihat pentingnya peranan peralatan instrumentasi dalam penentuan ukuran skala model dilihat contoh dibawah ini, yaitu contoh skala model berdasarkan ketelitian alat ukur. Dengan alat yang terbatas akan ditentukan suatu ukuran skala model yang terbaik.

Contoh :

Permasalahan :

Akan dibuat suatu model hidraulik pintu air untuk navigasi. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mendapatkan suatu keyakinan bahwa gaya yang bekerja pada perahu/kapal selama pengisian maupun pengosongan pintu air tidak terlalu besar.

Persyaratan yang harus dipenuhi antara lain:

- gaya maksimum pada prototip 20 kN dengan $r_F = 5 \%$
- kemampuan alat ukur yang ada dilaboratorium $0 < F < 400 \text{ mN}$ dengan $r_F = 4 \%$.

Ditanya:

- a. Model dibuat distorted ataukah undistorted?
- b. Kriteria kesebangunan apakah yang dipakai?
- c. Seberapa besar skala panjang yang dipakai?
- d. Berilah komentar tentang pemilihan skala yang akan dipakai di model!

Jawab :

- a. Mengingat percepatan vertikal dan horisontal harus sama dengan percepatan gravitasi, maka dipilih "undistorted model"
- b. Gaya inersia dan gaya gravitasi sama-sama penting baik di prototip maupun di model, maka kriteria sebangun adalah: kriteria sebangun Froude (*Froude condition*).

$$n_{Fr} = 1$$

- c. Alat ukur : kesalahan alat maksimum = $4/100 \times 400 \text{ mN} = 16 \text{ mN}$.

Gaya maksimum yang diperkirakan timbul di model =

$$= \left(\frac{100}{5}\right) * 16 \text{ mN} = 320 * 10^{-3} \text{ N}$$

$$\text{Skala Gaya } n_{Fr} = \frac{F_p}{F_m} = (20 * 10^3 / 320 * 10^{-3}) =$$

$$62500$$

$$F = m * a$$

$$n_F = n_a * n_m = n_L^3$$

$$n_a = n_g = 1$$

$$n_\rho = 1$$

$$n_L = 62500^{\frac{1}{3}} = 39,7$$

- d. $n_L > 40$ -----> F_{model} terlalu kecil, model kurang teliti.
 $n_L < 40$ -----> F_{model} terlalu besar, ada kemungkinan alat ukur tidak mampu mengukur gaya yang timbul.

BAB III. REPRODUKSI FENOMENA HIDRAULIK

III.1. Umum

Hubungan skala antar parameter yang akan dipergunakan untuk membuat model dibedakan menjadi dua group sebagai berikut ini.

- a. **Hukum skala (“scale law”)** : yaitu hubungan antar skala parameter yang harus dipenuhi.

Contoh :

$$1) U = C * (a * i)^{0,5}$$

$$n_U = n_C * (n_a)^{0,5} * (n_i)^{0,5} \dots\dots\dots(3.1)$$

$$Re = U * L / \nu$$

$$n_{Re} = n_U * n_L * n_\nu^1 \dots\dots\dots(3.2)$$

$$2) Fr = U * (g * a)^{-0,5}$$

$$n_{Fr} = n_U * (n_g)^{-0,5} * (n_a)^{0,5} = n_U * (n_a)^{-0,5} \dots\dots\dots(3.3)$$

- b. **Persyaratan skala (“scale condition”)** : hubungan antar skala parameter yang harus dipenuhi untuk menghindari “scale effect”. Sering pula hal ini disebut **kriteria sebangun**.

Contoh :

1) Persamaan Bernoulli

$$H = h + s \dots\dots\dots(3.4)$$

Keterangan : H = tinggi energi

h = tinggi piezometrik

s = tinggi kecepatan = $U^2/2g$

$$n_H = \frac{H_p}{H_m} = \frac{h_p + s_p}{h_m + s_m} = \frac{n_h + \frac{s_p}{h_m}}{1 + \frac{s_m}{h_m}}$$

$$= \frac{n_h + n_s \cdot (\frac{s_m}{h_m})}{1 + \frac{s_m}{h_m}} \dots\dots\dots(3.5)$$

Untuk :

a. $n_H = n_s$ sehingga: $n_H = n_h = n_s$
(3.6)

b. $n_H \neq n_s$ sehingga: $n_H = f(n_h, n_s, s_m/h_m)$(3.7)

Hal ini menunjukkan bahwa n_H tidak hanya merupakan fungsi dari skala parameter yang lain tetapi juga merupakan fungsi parameters s_m/h_m . Karena s_m dan h_m selama penelitian model berlangsung nilainya berubah-ubah maka akan terjadi ketidak sebangunan antara model dan prototip atau terjadi apa yang disebut “*scale effect*”.

Dari contoh ini, dapat diambil kesimpulan bahwa “*scale effect*” tersebut dapat dihindari

dengan :

- Mengambil $n_H = n_S$ sebagai suatu kriteria sebangun geometri
- $s = U^2/2g$
 $n_h = n_s = (n_U)^2/n_g = (n_U)^2$
 $n_h = (n_h)^{0,5}$ sebagai suatu kriteria sebangun dinamik Froude.

2) Agar supaya tercapai sebangun dinamik antara model dan prototip pada pengaliran dengan muka air bebas, bilangan Froude pada model harus sama dengan yang ada di prototip, (hal ini mengingat gaya gravitasi dan gaya inersia di model dan prototip sama-sama memegang peranan).

$$Fr = U/(g * a)^{1/2} \text{ sehingga: } 1 = n_U/(n_g^{1/2} * n_a^{1/2})$$

$$n_g = 1$$

$$n_U = (n_a)^{1/2}$$

yang adalah merupakan kriteria sebangun dinamik Froude.

3) Agar supaya efek viskositas/kekentalan dapat tercermin dalam model, maka bilangan Reynold pada model dan prototip harus sama.

$$R_e = U * a/n \text{ sehingga diperoleh: } 1 = n_U * n_a/n$$

$$n_U = (n_a)^{-1} * n$$

Yang adalah kriteria sebangun dinamik Reynold

Pada aliran dengan turbulensi cukup tinggi (turbulen sempurna), model tidak harus memenuhi kriteria ini. Batas mengenai turbulensi sempurna ini beberapa peneliti memberikan batasan sesuai dengan hasil penelitiannya masing-masing. Sebagai gambaran mengenai nilai batas tersebut (untuk aliran pada saluran) dapat dilihat pada tabel 3.1.

Tabel III.1 Kriteria batas aliran turbulen sempurna

| No | Nama Peneliti | Kriteria Bil. Reynold | Nilai Batas |
|----|---------------|-----------------------|--------------|
| 1 | de Vries | $\frac{Uh}{\nu}$ | > 400 sd 800 |
| 2 | Russel | $\frac{UR}{\nu}$ | > 1000 |
| 3 | Henderson | $\frac{U * k}{\nu}$ | > 100 |
| 4 | Yalin | $\frac{U * k}{\nu}$ | > 70 |

III.2. Aliran Muka Air Bebas (“free surface flow”)

Persamaan gerak :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{g \cdot U \cdot |U|}{C^2 \cdot a} \dots\dots\dots(3.8)$$

Substitusi $p = \rho \cdot g \cdot a + \rho \cdot g \cdot z$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{U^2}{2 \cdot g} \right) = -\frac{\partial a}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{U \cdot |U|}{C^2 \cdot a} \dots\dots\dots(3.9)$$

┌──────────────────┐ (4) ───┐
┌───┐ (3) ───┐
└───┐ (1) ───┐
└───┐ (3) ───┐
└───┐ (2) ───┐

Persamaan kontinuitas :

$$\frac{\partial a}{\partial t} + U \frac{\partial a}{\partial x} + a \frac{\partial U}{\partial x} = 0$$

└───┐ (1) ───┐(3.10)

Dari kedua persamaan tersebut didapatkan hubungan skala sebagai berikut ini.

- 1) **Sebangun kinematik** (“*kinematic condition*”)
 $n_L = n_U \cdot n_t \dots\dots\dots(3.11)$

Hubungan ini dapat diturunkan baik dari persamaan gerak ataupun persamaan kontinuitas.

Persamaan gerak : $n(\partial U/\partial t) = n(\partial U^2/\partial x)$ (3.1)

2) $n_U/n_t = (n_U)^2/n_L$
 $n_L = n_U + n_t$

persamaan kontinuitas : $n(\frac{\partial a}{\partial t}) = n(U \frac{\partial a}{\partial x})$

$n_a \cdot (n_t)^{-1} = n_U \cdot n_a \cdot (n_L)^{-1}$

$n_L = n_U \cdot n_t$

2) **Sebangun geometric** (“*geometric condition*”)

$n_a = n_z$(3.14)

3) **Sebangun dinamik – Froude**(“*Froude condition*”)

$n_U = (n_a)^{1/2}$(3.15)

4) **Sebangun dinamik – kekasaran**(“*roughness condition*”)

$(n_C)^2 = n_L/n_a = r$(3.16)

Dari persamaan tersebut diatas terlihat bahwa skala n_L tidak harus sama dengan n_a , jadi pada model ini dimungkinkan adanya distorsi sebesar $r = n_L/n_a$.

Untuk “*steady uniform flow*”, persamaan aliran dapat disederhanakan dengan menggunakan persamaan Chezy.

Dalam hal ini : $\frac{\partial q}{\partial x} = 0$; $\frac{\partial z}{\partial x} = i$

sehingga: $U = C*(a*i)^{1/2} \dots\dots\dots (3.17)$

Hubungan skala : $n_U^2 = n_C^2 * n_a * n_i$

$$n_i = n_{\Delta h} / n_L$$

$$n^2 = n_a (n_C * n_a / n_L) * (n_{\Delta h} / n_a) \dots\dots\dots (3.18)$$

Hal ini menunjukkan bahwa :

- a. Jika “*Froude condition*” dipenuhi ($n_U^2 = n_a$) dan “*roughness condition*” juga dipenuhi, maka secara otomatis $n_{\Delta h} = n_a$
- b. Jika “*Froude condition*” atau “*roughness condition*” tidak dipenuhi, maka kemungkinan besar akan terjadi “*scale effect*”, namun hal ini dapat diperkecil pengaruhnya dengan jalan melakukan “*tilting model*”, dan hal ini akan dijelaskan pada bab selanjutnya.

Agar supaya “*roughness condition*” terpenuhi, seringkali model harus diberi kekasaran tambahan. Untuk model dengan dasar tetap (“*rigid bed model*”) beberapa hal dibawah ini dapat dipertimbangkan.

- a. **Model tanpa distorsi dan hidraulik kasar** (“*undistorted model, hydraulic rough*”)

Model tanpa distorsi $r = 1$ sehingga skala: $n_C^2 = 1$

$$C = 5,75 g^{0,5} \log (12*a/(k + \delta/3,5))$$

$$= 18 \log(12*a/(k + \delta/3,5))$$

Hidraulik kasar $k \gg \delta$

$$C = 18 \log (12 \cdot a/k) \dots\dots\dots(3.19)$$

$$n_C = 1 \quad \text{maka: } n_k = n_a \dots\dots\dots(3.20)$$

b. **Model tanpa distorsi dan hidraulik licin**(“*undistorted model, hydraulic smooth*”)

Model tanpa distorsi $r = 1$ sehingga skala: $n_C^2 = 1$

$$C = 18 \log (12 \cdot a/(k + \delta/3,5))$$

Hidraulik licin $\delta \gg k$

$$C = 18 \log (12 \cdot a/(k + \delta/3,5)) \dots\dots\dots(3.21)$$

$$n_C = 1 \quad \text{sehingga:} \quad n_\delta = n_a \dots\dots\dots(3.22)$$

$$\delta = 11,6 \nu/U$$

$$n_\delta = n_\nu \cdot (n_{U^*})^{-1}$$

$n_\nu = 1$ (model dan prototype menggunakan zat cair yang sama air)

$$n_\delta = (n_U)^{-1}$$

$$U = 5,75 U_* \log (12 \cdot a/(k + \delta/3,5))$$

$$U/U_* = C/g^{0,5}$$

$$n_\delta = (n_U)^{-1} \cdot n_C$$

$$= (n_U)^{-1} \quad \text{sehingga} \quad n\delta = (n_a)^{-0,5} \dots\dots\dots(3.23)$$

Yang dinamakan sebagai “*trivial solution*”, ukuran model sebesar prototip.

c. Model dengan distorsi normal dan hidraulik kasar (“*normally distorted model*”)

$$r = n_L/n_a < 4 \text{ s/d } 5$$

$$C = 25 (a/k)^{1/6} \dots\dots\dots(3.24)$$

$$(n_C)^2 = r$$

$$\dots\dots\dots(3.25)$$

$$r = \frac{(a_p/k_p)^{1/3}}{\left(\frac{a_m}{k_m}\right)^{1/3}}$$

$$n_k = n_a \cdot r^{-3}, \text{ atau}$$

$$n_k = (n_a)^4 / (n_L)^3 \dots\dots\dots(3.26)$$

d. Model dengan distorsi besar dan hidraulik kasar (“*strongly distorted model*”)

$$C_o^2 = U^2 / (a \cdot i) \dots\dots\dots(3.27)$$

$$r_o = \rho g a i$$

$$r_o = \rho g U^2 C_o^{-2} \dots\dots\dots(3.28)$$

$$r_o = r_1 + r_2 \dots\dots\dots(3.29)$$

Tegangan gesek yang ditimbulkan oleh dasar :

$$r_1 = \rho g U^2 C_1^{-2} \dots\dots\dots(3.30)$$

tegangan gesek yang disebabkan oleh n batang :

$$r_2 = \frac{1}{2} n \rho g C_D U^2 D h \dots\dots\dots(3.31)$$

jumlah batang persatuan luas yang dibutuhkan :

$$r_0 = r_1 + r_2$$

$$n = \left[\frac{1}{C_0^2} \cdot \frac{1}{C_1^2} \right] \dots\dots\dots(3.32)$$

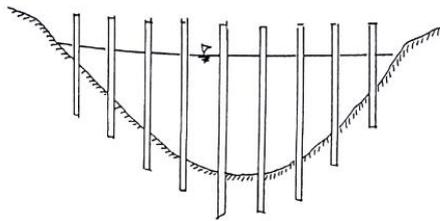
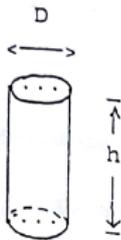
keterangan:

$C_1 = 18 \log (12 a/k)$ yang didasarkan pada lantai model yang dibuat dari beton.

$C_0 = U / (a i)^{0.5}$ yang diturunkan dari perhitungan skala model

$$n_c^2 = r$$

$$C_0 = C_p \cdot r^{-1/2}$$



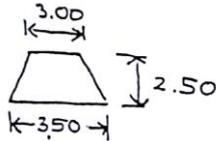
Contoh

1. Suatu model sungai dengan dasar tetap ditentukan skala $n_a = 100$ dan dengan distorsi sebesar $r = 3$. Apabila pengalirannya hidraulik kasar, tentukan skala kekasaran dasarnya n_k ?

Dengan menggunakan gambar 3.1

maka: $x = 0,21 \text{ m}$

Sket penempatan “concrete blok”



Dengan menggunakan gambar 3.2

makadengandiatas lantai model ditaburi gravel 5/30, 1 liter/m³

III.3. Gelombang

3.3.1 Perambatan Gelombang

Rumus kecepatan gelombang dapat dituliskan sebagai berikut:

$$C = \sqrt{\left(\frac{g\lambda}{2\pi} + \frac{2\sigma\pi}{\rho\lambda}\right) \tanh\left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)} \quad \dots\dots\dots (3.33)$$

$$\sigma_{air-udara} = 74 \text{ mN/m}^2$$

Untuk menghindari pengaruh tegangan muka pada model (σ) maka diambil panjang gelombang di model $\lambda_m > 0,20 \text{ m}$, rumus menjadi

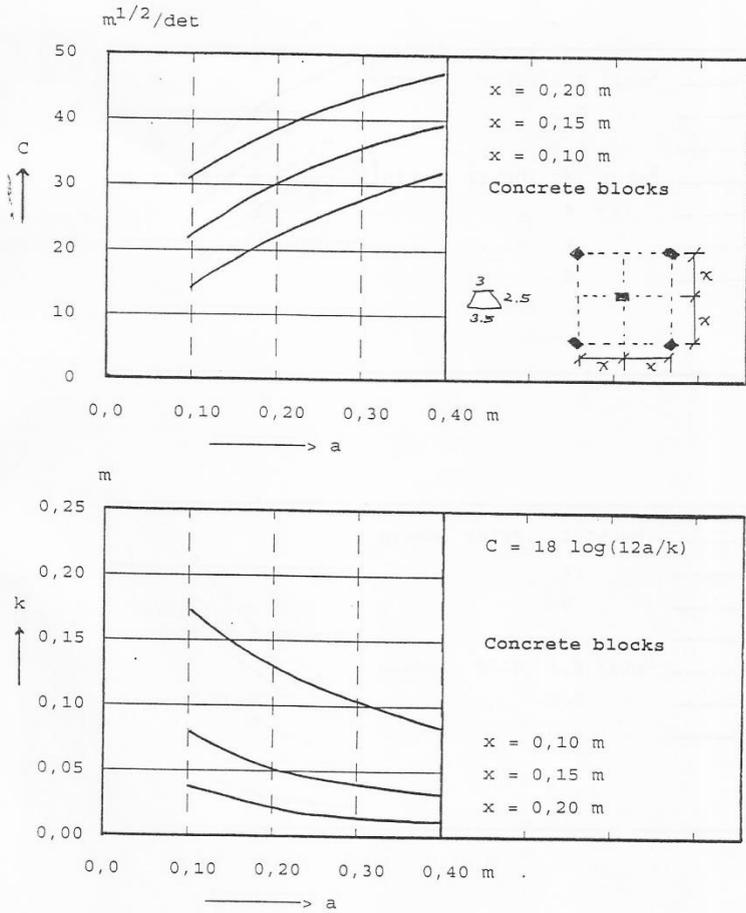
$$C = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)} \lambda = C.T \dots\dots\dots(3.34)$$

Umum :

$$n_a = n_\lambda$$

$$n_c = (n_\lambda)^{1/2}$$

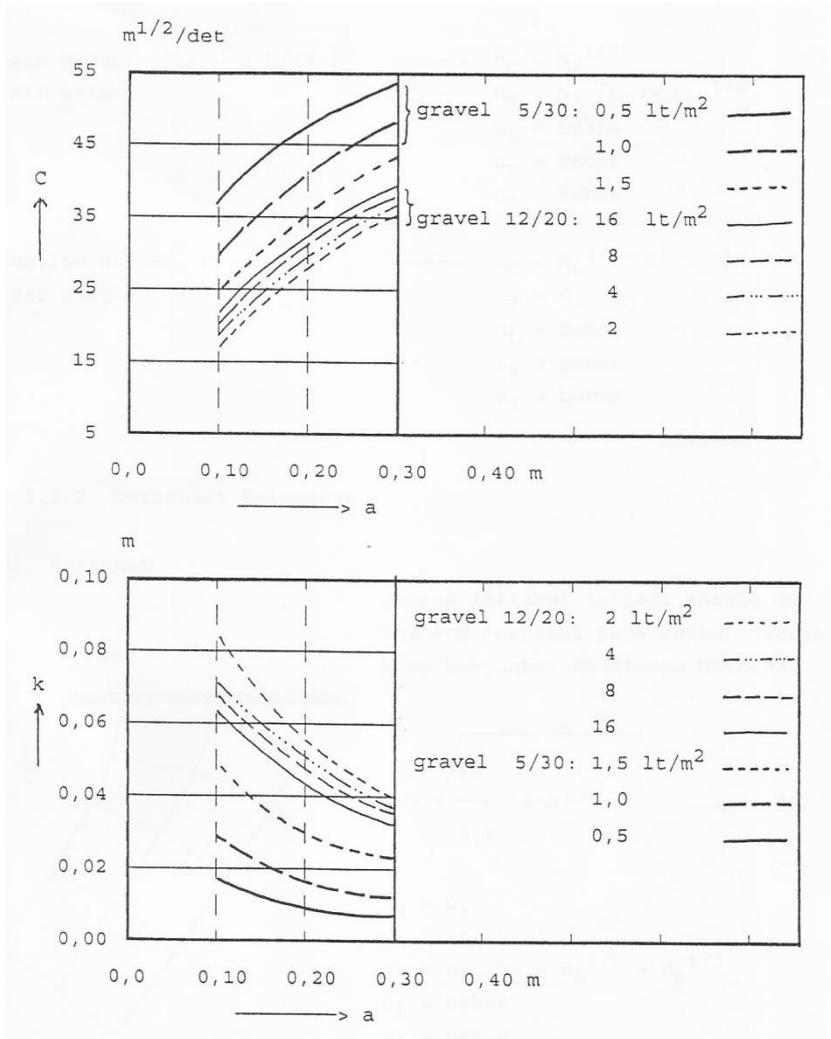
$$n_T = \frac{n_\lambda}{n_c} = \frac{n_\lambda}{n_\lambda^{1/2}} = n_\lambda^{1/2}$$



$n_L = \text{bebas}$

$n_\lambda = \text{bebas}$

Gambar III.1 Kekasaran buatan dengan mempergunakan blok beton yang diatur di dasar model



Gambar III.2 Kekasaran buatan dengan mempergunakan gravel yang disebar di dasar model

Deep water: $C = \sqrt{g \cdot \lambda / (2\pi)}$

$n_\lambda^{1/2}$

(air dalam)

maka: $n_C =$

$$n_T = \frac{n_\lambda}{n_C} = n_\lambda^{1/2}$$

Jadi model refraksi dapat dilakukan dengan distorsi.

b). Difraksi

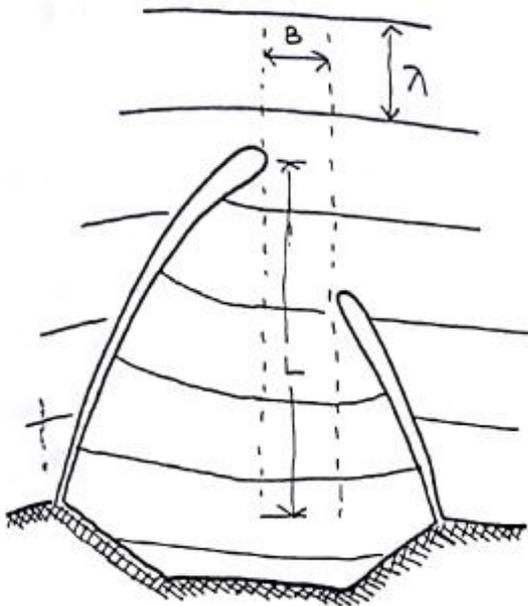
Proses difraksi terjadi apabila perambatan gelombang terhambat oleh adanya rintangan, seperti pemecah gelombang dan sebagainya. Pada permasalahan ini skala panjang harus sama dengan skala panjang gelombang

$$n_a = n_\lambda$$

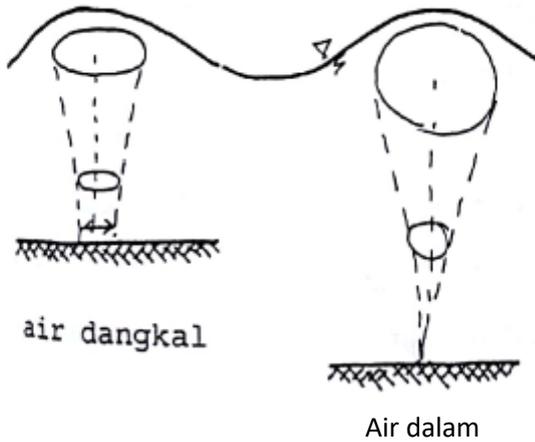
$$n_C = (n_\lambda)^{1/2}$$

$$n_T = n_\lambda^{1/2} = n_a^{1/2}$$

$$n_L = n_\lambda \longrightarrow n_L = n_a \text{ adalah model tanpa distorsi}$$



c). Kecepatan orbit partikel air



$$U_z = \frac{w H \cosh kz}{2 \sinh(ka)} \cos(\omega t - kx) \dots (3.36)$$

$$n_T = n_a^{1/2}$$

$$n_{ka} = 1 \longrightarrow \text{maka: } n_k = n_a^{-1}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \longrightarrow \text{maka: } n_k = n_\lambda^{-1/2}$$

$$n_a = n_\lambda$$

$$n_U = n_W \cdot n_H = n_T^{-1} \cdot n_H = n_a^{-1/2} \cdot n_H$$

III.4. Proses Morfologi

3.4.1 Angkutan sedimen yang disebabkan oleh aliran

Pada proses morfologi, baik gerakan sedimen ataupun aliran harus direproduksi dimodel dengan kesebangunan yang

memadai, sehingga permasalahan yang ada diprototip ikut terbawa kemodel. Dalam proses modeling ini perlu diusahakan agar “ scale effect “ yang timbul sekecil mungkin, yaitu dengan mempergunakan criteria kesebangunan berdasar parameter angkutan sedimen dan aliran. Parameter angkutan sedimen (X) dan parameter aliran (Y) di model dan prototip haruslah sama.

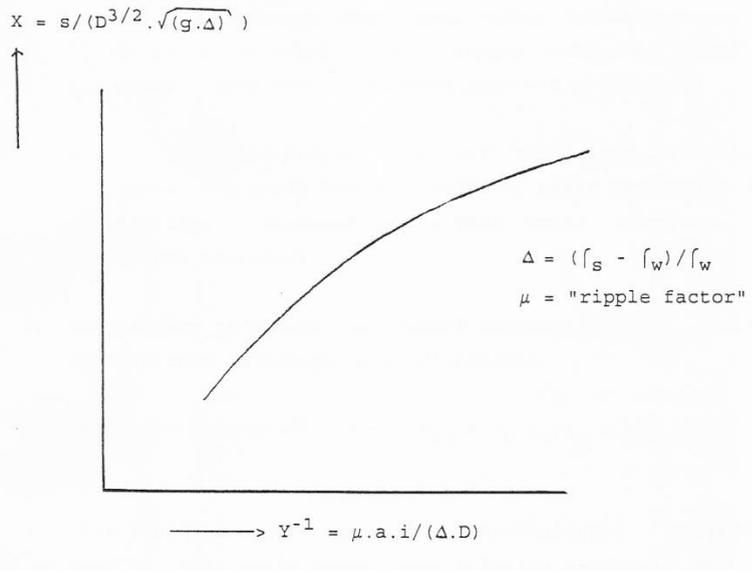
Parameter angkutan sedimen : $X = \frac{s}{D^{3/2}\sqrt{\Delta g}}$ (3.37)

Parameter aliran : $Y = \frac{\Delta D}{\mu \cdot a \cdot i}$ (3.38)

1). $n_x = 1$ maka: $n_s = n_D^{3/2} \cdot n_\Delta^{1/2}$
 $n_s = n_D^{3/2} \cdot n_\Delta^{1/2} \cdot n_L$ (3.39)

2). $n_y = 1$ maka: $n_{\Delta D} = n_{\mu ai}$ $U = C (a \cdot i)^{1/2}$

$n_\Delta \cdot n_D = n_\mu \cdot n_C^{-2} \cdot n_U^2$
 $n_U^2 = n_{\Delta D} \cdot n_C^2 \cdot n_\mu^{-1}$ adalah kecepatan ideal (“*ideal velocity*”)
 (3.40)



Gambar III.3 Sketsa parameter angkutan sedimen vs parameter aliran

3). Kriteria kesebangunan – Froude

$$n_U^2 = n_a \dots\dots\dots (3.41)$$

Untuk membuat model yang harus memenuhi kedua kriteria kecepatan tersebut (kecepatan ideal dan Froude) adalah cukup sulit. Untuk model hidraulik dimana proses morfologi sangat penting maka masih diperkenankan tidak memenuhi kriteria sebangun – Froude. Untuk mengatasi keadaan ini dapat dilakukan dua cara, yaitu:

- a). Menerima kondisi $n_U < n_a$ dan melakukan koreksi terhadap penyimpangan yang timbul akibat tidak terpenuhinya kriteria

sebangun Froude dengan melakukan “*tilting model*”, yang akan di jelaskan pada bab selanjutnya;

b). Memilih bahan sedimen model dari bahan yang lebih ringan (misalnya pasir buatan – bakelit, pasir batu bara dsb), sehingga didapatkan skala yang benar (memenuhi kedua syarat tersebut).

4). Berdasarkan persamaan kontinuitas angkutan sedimen, skala waktu proses morfologi dapat ditentukan

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial s}{\partial x} = 0 \text{ sehingga diperoleh skala } n_{tm} = n_L \cdot n_a / n_s = n_L^2 \cdot n_a / n_s \quad \dots \dots \dots (3.42)$$

5). Jika sebagian besar angkutan sedimen melayang (“*suspended load*”), maka perlu menggunakan kriteria sebangun yang berkaitan dengan distribusi konsentrasi sedimen, dan hal ini akan menghasilkan persyaratan sebagai berikut:

$$n_W = n_{U_*}$$

$$W = \sqrt{\left(\frac{4}{3}\right) \cdot \left(\frac{g}{C_D}\right) \cdot \Delta D}$$

dimana:

$$C_D = 24/Re \quad \text{untuk } Re < 1$$

$$C_D = 1 \quad Re > 0 (1000) \dots\dots\dots (3.43)$$

6). Kriteria sebangun – proses morfologi dari MPM (Meyer – Peter dan Muler)

$$X = \alpha (Y^{-1} \cdot \beta)^{3/2} \dots\dots\dots (3.44)$$

$$n_X = (n_Y)^{-3/2}$$

$$\mu = (C/C_{90})^{3/2}$$

$$n_U^2 = n_\Delta \cdot n_D \cdot n_C^{1/2} \cdot n_{C90}^{3/2} \dots\dots\dots (3.45)$$

7). Kriteria sebangun – proses morfologi dari Engelund – Hanzen

$$\mu = (C^2/g)^{2/5} \dots\dots\dots (3.46)$$

$$X = 0,084 Y^{-5/2} \dots\dots\dots (3.47)$$

$$n_X = (n_Y)^{-5/2}$$

$$n_U = (n_\Delta)^{2/5} \cdot (n_D)^{1/5} \cdot (n_C)^{3/5} \cdot (n_s)^{1/5} \dots\dots\dots (3.48)$$

3.4.2 Angkutan sedimen yang disebabkan oleh gelombang

^Dua hal yang sangat penting dalam proses angkutan pasir akibat gerakan gelombang adalah:

a). Gelombang mengatur gerakan pasir.

Hal ini diekspresikan dengan “*stirring parameter*”

$$SP = \Delta \cdot D \cdot \rho \cdot g / (\mu \cdot T_r) \dots\dots\dots (3.49)$$

b). Aliran mengangkut butiran pasir

Hal ini diekspresikan dengan “*transport parameter*”

$$TP = \frac{s}{(D\sqrt{Tc/\rho})} \dots\dots\dots (3.50)$$

Maka untuk menentukan skala parameter pada model perlu dipertimbangkan hal-hal sebagai berikut ini.

1). Kecepatan orbit partikel air di dasar laut harus sebangun.

$$n_{VO} = \sqrt{(n_{\Delta} \cdot n_D \cdot n_{\mu}^{-1})} \dots\dots\dots (3.51)$$

2). Kriteria sebangun proses morfologi akibat adanya aliran.

$$n_U = n_C \sqrt{n_{\Delta} \cdot n_D \cdot n_{\mu}^{-1}} \dots\dots\dots (3.52)$$

Untuk memenuhi kedua persyaratan skala kecepatan tersebut adalah sangat sulit, apalagi persyaratan kesebangunan Froude juga harus dipenuhi. Pada umumnya pasir di daerah pantai adalah sangat halus sehingga pemakaian pasir yang memenuhi persyaratan skala tersebut diatas termasuk terlalu halus. Oleh karena itu penentuan skala pada permasalahan ini biasanya didasarkan pada “*scale effect*” terkecil yang timbul dimodel. Disarankan untuk memakai bahan hasil buatan mengingat rapat massa dan ukuran butirannya dapat diatur sesuai kebutuhan. Dari persyaratan tersebut di atas terlihat bahwa model proses morfologi pantai adalah sangat sulit karena harus memenuhi persyaratan; kekasaran, aliran, angkutan pasir dan gelombang.

Vellinga (1982) memberikan pedoman untuk membuat model pantai dengan distorsi, yaitu dengan mendasarkan model pada hubungan:

$$\frac{n_L}{n_h} = \left[\frac{n_h}{n_W^2} \right]^{0,28} \dots\dots\dots (3.53)$$

Keterangan: n_L = skala panjang

n_h = skala vertical = n_H

n_W = skala kecepatan jatuh pasir d_{50}

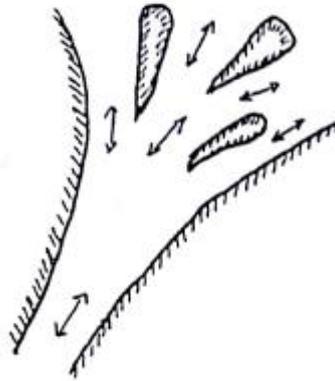
Sedangkan Iwagaki dan Noda (1981), juga Sato dan Tanaka menyarankan agar skala model distorsi pantai diturunkan berdasarkan hubungan:

$$\frac{H_O}{\lambda_O} = 0,565 \cdot \left(\frac{d_{50}}{\lambda_O} \right)^{1/3} \cdot \left(\sinh \frac{2\pi h}{\lambda} \right) \left(\frac{H_O}{H} \right) \dots\dots\dots (3.54)$$

$$n_h = n_\lambda \neq n_L \qquad n_{d50} = \frac{n_H^3}{n_\lambda^2} \dots\dots\dots (3.55)$$

BAB IV. PERENCANAAN MODEL HIDRAULIK

IV.1. Pendahuluan



Dalam merencanakan model hidraulik perlu dipertimbangkan beberapa aspek yang berkaitan dengan maksud pembuatan model tersebut, diantaranya adalah:

- a). Hubungan antar skala parameter (hukum skala dan criteria kesebangunan),
- b). Tujuan model (untuk menentukan criteria kesebangun yang akan dipakai dalam penentuan skala),
- c). Ketelitian model yang diharapkan (dengan mengingat ketelitian peralatan yang ada dilaboratorium),
- d). Ketelitian/kesaksamaan terhadap peramalan fenomena yang ada di prototip (perlu diperhitungkan “*scale effect*”),

e). Fasilitas yang ada di laboratorium (pompa, ruangan, alat ukur tekanan).

Untuk membuat model yang baik dan teliti perlu data prototip yang teliti pula. Data prototip inilah yang akan digunakan sebagai dasar pembuatan model, baik untuk bangunannya ataupun kalibrasi dan verifikasi.

Fasilitas yang perlu dipertimbangkan dalam pembuatan model hidraulik antara lain:

- a). Ketersediaan ruangan,
- b). Ketersediaan debit dan tekanan (pompa, suplai air),
- c). Ketersediaan bahan dan material,
- d). Ketersediaan instrumentasi dan system control,
- e). Ketersediaan alat pengatur sedimen ("*sediment suplayer*")
- f). Ketersediaan staf peneliti (pengalaman).

IV.2. Perencanaan model hidraulik dengan dasar tetap

(“*fixed/rigid bed model*”)

4.2.1 Gerakan pasang surut di muara sungai (“*tidal estuary*”)

Dasar pembuatan skala:

- 1). Model dengan distorsi

$$r = n_L/n_a$$

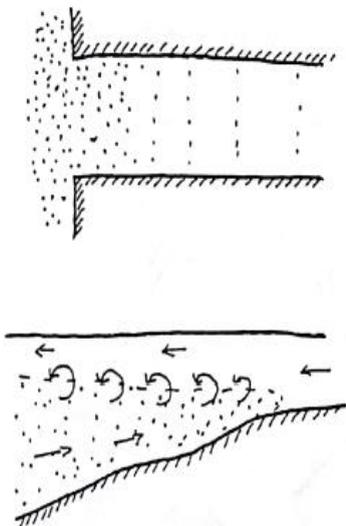
- 2). Kriteria sebangun – Froude

$$n_U = n_a^{1/2}$$

- 3). Kriteria sebangun – kekasaran

$$n_C^2 = \frac{n_L}{n_a} = r$$

4.2.2 Intrusi air laut (“*salinity intrusion*”)



Dasar pembuatan skala:

1). Model dengan distorsi

$$r = n_L/n_a$$

2). Kriteria sebangun – Froude

$$n_U = n_a^{1/2}$$

3). Kriteria sebangun – kekasaran

$$n_C^2 = \frac{n_L}{n_a} = r$$

4). Kriteria sebangun – rapat masa

$$n_{\Delta\rho} = n\rho$$

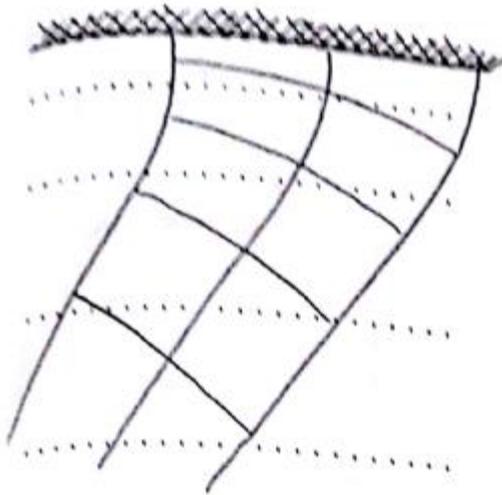
5). Kriteria sebangun – “interface”

$$r = \frac{n_L}{n_a} = n_{fi}^{-1}$$

Persyaratan 2) dan 4), kalau digabung memberikan kriteria sebangun – “internal Froude” (“internal Froude condition”):

$$F_{ri} = \frac{U}{\left(\sqrt{g \cdot a \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho}}\right)}$$

4.2.3 Refraksi gelombang (“wave refraction”)



Dasar pembuatan skala:

- 1). Model dengan distorsi

$$r = n_L/n_a$$

- 2). Kriteria sebangun – Froude

$$n_C = n_a^{1/2}$$

- 3). Kriteria sebangun – kekasaran

Kriteria ini tidak penting

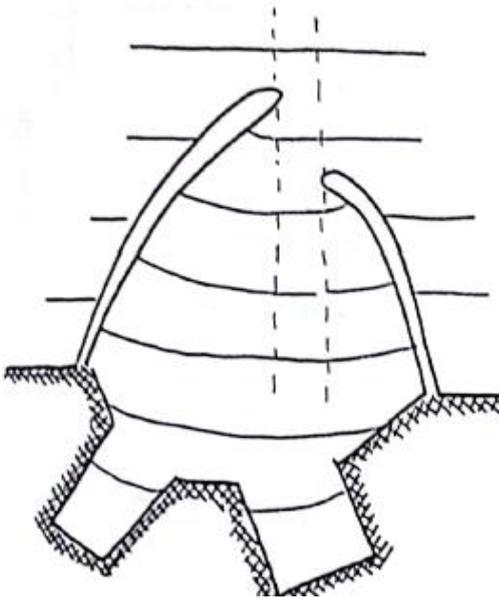
- 4). Kriteria sebangun – geometric

$$n_a = n_\lambda$$

- 5). Pengaruh tegangan muka dihindari dengan memakai $\lambda_m >$

20 cm

4.2.4 Difraksi gelombang (“wave diffraction”)



Dasar pembuatan skala:

- 1). Model tanpa distorsi

$$n_L = n_a$$

- 2). Kriteria sebangun – Froude

$$n_C = n_a^{1/2}$$

- 3). Kriteria sebangun – kekasaran

Kriteria ini tidak penting

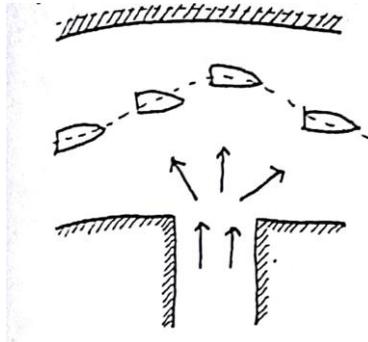
- 4). Kriteria sebangun – geometric

$$n_a = n_\lambda$$

5). Pengaruh tegangan muka dihindari dengan memakai $\lambda_m > 20$ cm

Catatan : $C = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \cdot \tanh\left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)}$ = kecepatan rambat gelombang

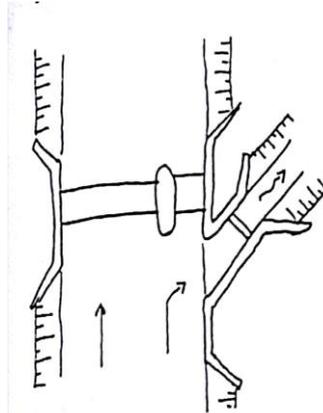
4.2.5 Gangguan arus terhadap navigasi



Dasar pembuatan skala:

- 1) Model tanpa distorsi
 $n_L = n_a$
- 2) Kriteria sebangun – Froude
 $n_U = n_a^{\frac{1}{2}}$
- 3) Kriteria sebangun – kekasaran
Kriteria ini tidak penting

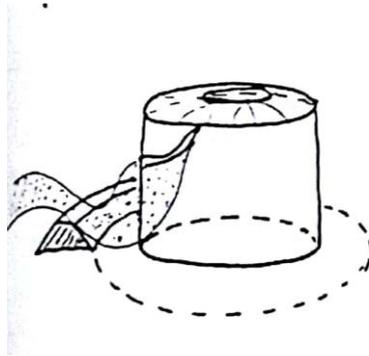
4.2.6 Kolam pengendap pasir (“settling basin”)



Dasar pembuatan skala:

- 1) Model tanpa distorsi
 $n_L = n_a$ (dapat dengan distorsi, skala menyesuaikan)
- 2) Kriteria sebangun – Froude
 $n_U = n_a^{\frac{1}{2}}$
- 3) Kriteria sebangun – kekasaran
Kriteria ini tidak penting
- 4) Kriteria sebangun – proses pengendapan
 $n_U = n_w$

4.2.7 Tangki minyak

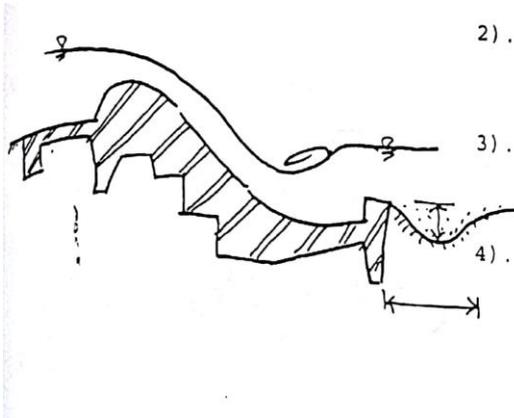


Dasar pembuatan skala:

- 1) Model tanpa distorsi
 $n_L = n_a$
- 2) Kriteria sebangun – Froude
 $n_U = n_a^{\frac{1}{2}}$
- 3) Kriteria sebangun – Reynold
 $n_u \cdot n_L = n_v$

IV.3. Perencanaan Model Hidraulik Untuk Gerusan Lokal

4.3.1 Gerusan dihilir bendung



Dasar pembuatan skala:

- 1) Model tanpa distorsi

$$n_L = n_a$$

- 2) Kriteria sebangun – Froude

$$n_U = n_a^{\frac{1}{2}}$$

- 3) Kriteria sebangun – kekasaran

Kriteria ini tidak penting

- 4) Kriteria sebangun – proses morfologi/gerusan

$$U_* = (g \cdot a \cdot i)^{1/2}$$

$$n_{U_*} = n_{U_*cr}$$

$$\psi_{cr} = (U_{*cr})^2 / (\Delta \cdot g \cdot D)$$

$$n_{\psi_{cr}} = 1 \text{ maka: } n_{U_*cr} = (n_{\Delta} \cdot n_D)^{1/2}$$

$$U/U_* = C/(g)^{1/2}$$

$$n_U = n_{U_*} \quad \text{maka: } n_U = (n_{\Delta} \cdot n_D)^{1/2}$$

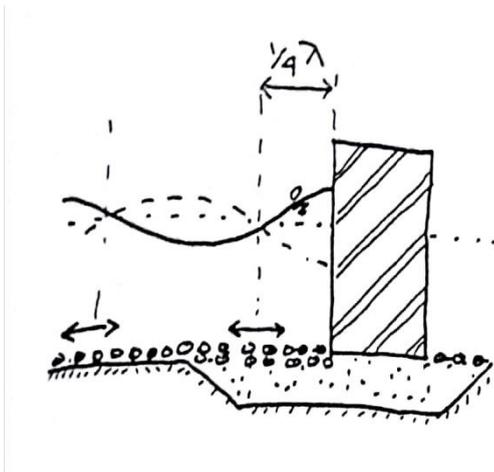
Atau $\psi_{cr} = (U_{*cr})^2 / (\Delta \cdot g \cdot D)$ didasarkan kriteria sebangun –
kecepatan ideal

$$n_U^2 = n_{\Delta D} \cdot n_C^2 \cdot n_\mu^{-1}$$

Karena permasalahan gerusan local maka “*ripple factor*”
dapat diabaikan:

$$n_U = (n_\Delta \cdot n_D)^{1/2} \longrightarrow Re_* = U_* \cdot D / \nu$$

4.3.2 Proteksi gerusan akibat “*standing wave*”



Dasar pembuatan skala:

- 1) Model tanpa distorsi

$$n_L = n_a$$

- 2) Kriteria sebangun – Froude

$$n_U = n_a^{1/2}$$

- 3) Kriteria sebangun – kekasaran

Kriteria ini tidak penting

- 4) Kriteria sebangun – proses morfologi/gerusan

$$n_{U^*} = n_{U^*cr}$$

$$\psi_{cr} = (U_{*cr}^2)/(\Delta \cdot g \cdot D)$$

$$n_{\psi_{cr}} = 1$$

$$n_{U^*cr} = (n_\Delta \cdot n_D)^{1/2}$$

$$U/U_* = C/(g)^{1/2}$$

$$n_U = n_{U^*}$$

$$n_U = (n_\Delta \cdot n_D)^{1/2}$$

- 5) Kriteria sebangun – geometri

$$n_a = n_\lambda$$

$$n_a = n_H$$

- 6) Untuk menghindari pengaruh tegangan muka pada model

$$\lambda_m > 20 \text{ cm}$$

IV.4. Perencanaan Model Hidraulik Dengan Dasar Tidak

Tetap (“*moveable/mobile bed model*”)

4.4.1 “*Titled model*”

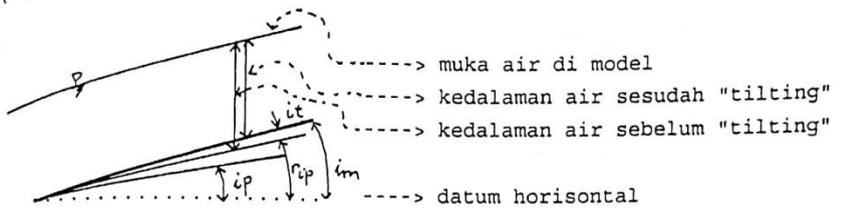
Pada model dasar berubah, biasanya tidak akan terpenuhi

kedua syarat:

- 1) kriteria sebangun – Froude, dan

2) kriteria sebangun – proses morfologi (kecepatan ideal).

Dengan demikian $n_U^2 \neq n_a$, dan biasanya $n_U^2 < n_a$. Hal ini akan mengakibatkan $n_{\Delta H} < n_a$ atau landai muka air di model akan terlalu terjal (“steep”); elevasi model menjadi tidak benar terhadap elevasi muka air, namun benar terhadap datum horizontal. Padahal secara prinsip kedalaman air di model harus ditirukan secara benar. Untuk mengatasi ini maka model perlu dibuat lebih miring (“tilted model”).



Keterangan:

i_p = landai pada prototip,

i_{ip} = landai model akibat adanya distorsi,

i_m = landai model yang dipakai,

i_t = sudut tambahan (“tilting”) yang diberikan, yang besarnya dapat ditentukan dengan rumus:

$$i_t = i_p \cdot \left(\frac{n_c^2 \cdot n_a}{n_U^2} - r \right) \quad \dots \dots \dots (4.1)$$

1) apabila $n_c^2 = r$ dan $n_U^2 = n_a$, maka $i_t = 0$, model dibuat tanpa memerlukan “tilting”;

- 2) untuk menghindari “tilting” dapat pula dilakukan dengan pemilihan bahan sedimen yang lebih ringan.

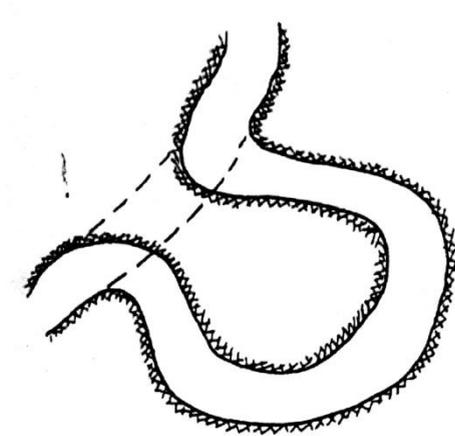
Kesalahan elevasi maksimum (Δh) pada ujung model akibat adanya “tilting” dapat dihitung dengan rumus:

$$\frac{\Delta h}{a_m} = \frac{1}{2} \left(\frac{L_p \cdot i_p}{a_p} \right) \cdot \left(\frac{n_a}{n_U^2} \right) \cdot \left(\frac{C_{me}^2}{C_{ma}^2} - 1 \right) \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

Penjelasan:

- 1) Model pasang surut tidak dapat dilakukan dengan “*tilted model*”.
- 2) Untuk menghitung dan menaksir C_{me} (perkiraan nilai C pada model = $C_{estimate}$) perlu pengalaman dan literatur.
- 3) C_{ma} (nilai C di model yang sebenarnya = C_{actual}) perlu dihitung sesudah model jadi.
- 4) Perlu diketahui bahwa berdasarkan pengalaman, untuk mendapatkan agar $C_{me} = C_{ma}$ adalah sangat sulit.
- 5) Nilai $\Delta h/a_m$ tidak boleh terlalu besar, karena apabila hal ini terjadi berarti model tidak teliti.

4.4.2 Dasar perencanaan skala



- 1) Model dengan distorsi

$$r = n_L/n_a$$

- 2) Kriteria sebangun – Froude

$$n_U = n_a^{1/2}$$

Persyaratan ini bukanlah persyaratan mutlak, dan boleh tidak memenuhi; tapi usahakan nilainya tidak terlalu jauh.

- 3) Kriteria sebangun – kekasaran

$$n_C^2 = n_L/n_a$$

- 4) Kriteria sebangun – proses morfologi (kecepatan ideal).

$$n_U^2 = n_\Delta \cdot n_D \cdot n_C^{1/2} \cdot (n_{C90})^{3/2}$$

- 5) Untuk menghindari “*scale effect*” yang timbul akibat tidak terpenuhinya persyaratan butir 2, maka model perlu dikoreksi dengan melakukan “*tilting*”.

$$i_t = i_p \cdot \left(\frac{n_C^2 \cdot n_a}{n_U^2} - r \right)$$

4.4.3 Urut-urutan perencanaan model dengan dasar berubah

1) Fasilitas laboratorium

Fasilitas laboratorium yang tersedia di laboratorium perlu dipertimbangkan sebagai pembatas penentuan skala model, fasilitas tersebut antara lain:

- a. Ketersediaan ruangan (kaitannya dengan n_L).
- b. Ketersediaan bahan pasir ("*bed material*" model).
- c. Ketersediaan pompa (kaitannya debit yang dapat disediakan untuk keperluan model).
- d. Ketersediaan pengatur sedimen ("*sediment suplayer*").
- e. Ketersediaan alat pengukur dan instrumentasi.

2) Penentuan skala model (lihat gambar 4.1)

- a. Pilih n_a berdasarkan ketelitian yang diinginkan mengingat pembatas yang ada. Harap a pada model diambil $> 0,10$ m.
- b. Ambil nilai n_L , berdasarkan fasilitas ruangan yang ada.
- c. Hitung skala transpor sedimen dan waktu proses morfologi dengan rumus:

$$n_S = n_{\Delta}^{1/2} \cdot n_D^{3/2} \cdot n_L$$

$$n_{tm} = n_L^2 \cdot n_a / n_S$$

untuk berbagai bahan pasir yang tersedia di laboratorium yang mungkin dipakai untuk keperluan model dan tabelkan. Lewat tabel tersebut dapat diadakan pemilihan jenis pasir yang akan dipakai di model mengingat:

- apabila yang diinginkan adalah keseimbangan akhir dari proses morfologi, sebaiknya dipilih jenis pasir yang memberikan hasil dalam waktu yang singkat – model cepat (“*quick model*”);

- kalau proses perubahan keseimbangan yang akan diamati, maka perlu dipilih model lambat atau sedang.

d. Taksir kekasaran di model dan hitung skala kecepatan.

Untuk menaksir kekasaran di model, perlu pengalaman dan literatur. Model yang menggunakan pasir alam dapat melihat informasi yang diberikan oleh Guy et al. (1966).

Dengan harga taksiran kekasaran tersebut (C_{me}) dapat ditentukan skala kecepatannya berdasarkan kriteria sebangun.

proses morfologi.

$$n_U^2 = n_\Delta \cdot n_D \cdot n_{Ce}^2 \cdot n_\mu^{-1}$$

$$\mu = (C/C_{90})^{3/2}$$

$$n_U^2 = n_\Delta \cdot n_D \cdot n_{Ce}^{1/2} \cdot n_{C90}^{3/2}$$

e. Pilih kemiringan tambahan (“*tilting angle*”) berdasarkan

$$i_t = i_p \cdot \left(\frac{n_{Ce}^2 \cdot n_a}{n_U^2} - r \right)$$

Ambil nilai :

$$r \leq 3$$

n_a dan n_L bukan bilangan pecahan

f. Hitung kesalahan elevasi muka air maksimum (Δh) yang mungkin terjadi, dengan rumus:

$$\frac{\Delta h}{a_m} = \frac{1}{2} \left(\frac{L_p \cdot i_p}{a_p} \right) \cdot \left(\frac{n_a}{n_U^2} \right) \cdot \left(\frac{C_{me}^2}{C_{ma}^2} - 1 \right)$$

g. Hitung skala kecepatan berdasarkan kriteria sebangun Froude

$$n_U = n_a^{1/2}$$

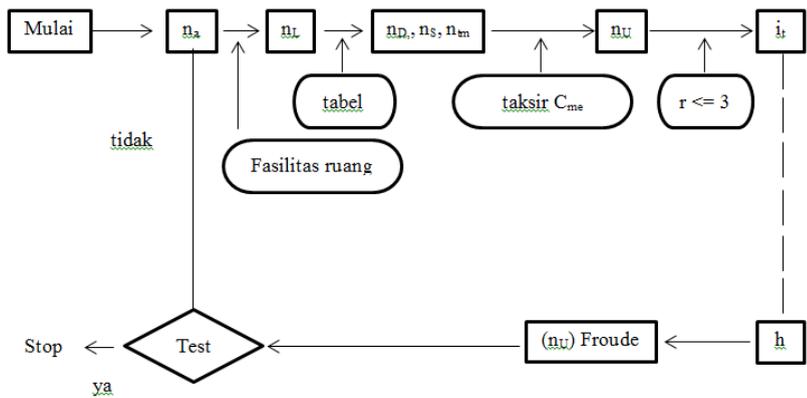
h. Kontrol:

a. Apakah aliran di model turbulen?

b. Apakah $U_m > U_{cr}$? Untuk mengecek keadaan ini pakailah grafik Shield.

c. Seberapa jauh skala kecepatan memenuhi kriteria sebangun Froude dan kekasaran ("*Froude dan Roughness condition*")?

d. Apakah kesalahan pada muka air masih dapat diterima?

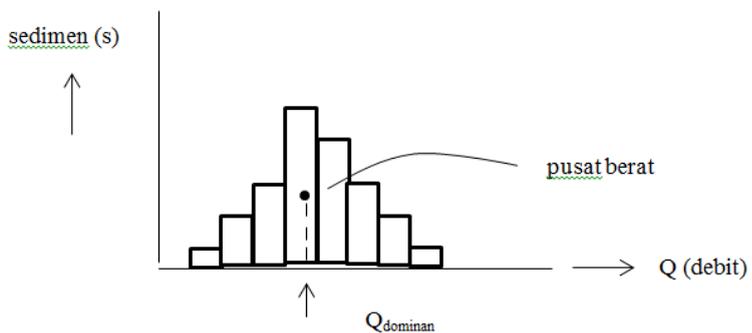


Gambar IV.1 Ringkasan penentuan skala model – proses morfologi

3) Pemakaian/pemilihan debit pada model

Untuk sungai yang tidak terpengaruh pasang surut, debit yang dipakai di model disarankan adalah debit dominan (*“dominan discharge”*) (lihat gambar 4.2).

$$\text{Debit dominan} = Q_{\text{dominan}} = \frac{\int Q \cdot S \, dt}{\int S \, dt} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

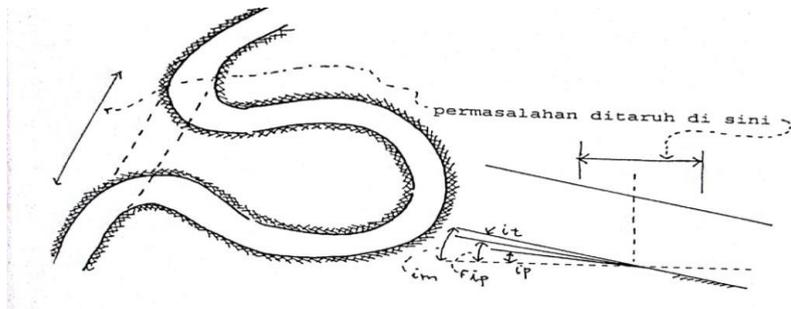


Gambar IV.2 Penentuan debit dominan

4) Penentuan panjang potongan sungai yang akan dimodel

Penentuan batas sungai yang akan dimodel didasarkan pada:

- a. kemungkinan perbaikan dasar sungai,
- b. kemungkinan membuat tratanan (*“short-cut”*),
- c. permasalahan harus diletakkan di tengah model, sehingga pengaruh *“tilting”* tidak begitu besar.

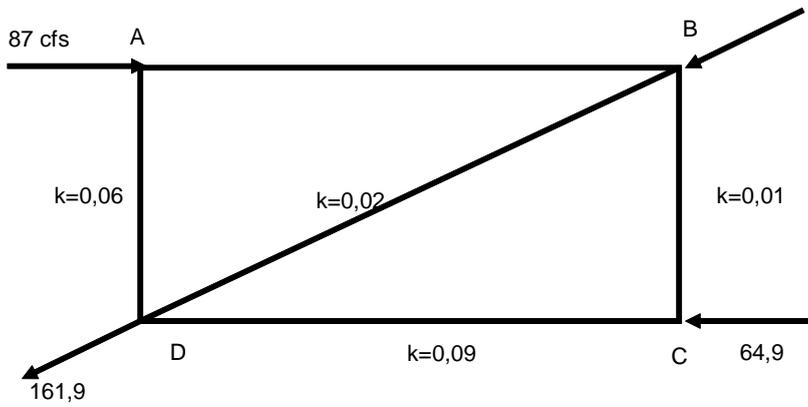


5) Kalibrasi dan verifikasi model.

IV.5. Perencanaan Model Hidraulik pada Sistem Perpipaan

4.5.1 Contoh Soal dan Penyelesaian

| | | | |
|------------|---|--------------------------------|--------|
| Diketahui: | Pipa AB panjang LAB | 1005 ft | |
| | Diameter (D) | 18 in | 1.5 ft |
| | tinggi tekan (h_f) umur 18 th | 1.365 psi | |
| | bila mengangkut air (Q) | 7.08 cfs | |
| | tinggi kekasaran pipa baru (ϵ) | 0.00015 ft | |
| | gravitasi (g) | 32.2 ft/sec ² | |
| | (ρ_{air}) | 1.94 slugs/ft ³ | |
| | t air | 68 F | |
| | air (ν) | 0.0000109 ft ² /sec | |
| | Pipa AB yang dipasang adalah pada umur | | 20 th |
| | Bensin (ν) | 0.000005 ft ² /sec | |



Soal:

- a. Hitung dan tentukan arah debit pengaliran tiap-tiap pipa
- b. Untuk mengetahui sifat-sifat pengaliran di B buat sebuah model dengan skala panjang 1:10. dan fluida yang dipakai adalah bensin berapa harusnya debit pada model.

Penyelesaian:

Keseimbangan Luar:

QA= 87 QC= 64.9 QD= 161.9
 QB= 10 (masuk)

Debit yang perlu dimasukkan kedalam sistem QB= 10 cfs

Pipa AB pada umur 18 tahun

V= 4.01 fps
 hf= 1.365 psi= 3.15 ft

f= 0.0188

Re= 5.52E+05

tinggi kekasaran relatif: $\frac{\epsilon}{D}$ 0.0007

tinggi kekasaran : ϵ_{18}

0.00105

$$\alpha = \frac{\epsilon_{18} - \epsilon_0}{18}$$

tinggi kekasaran : ϵ_0

0.00015

Alpha : α

0.00005

tinggi kekasaran : ϵ_{20}

0.00115 ft

$$\epsilon_{20} = \epsilon_0 + \alpha t$$

tinggi kekasaran relatif pd 20 th

$\frac{\epsilon}{D}$ 0.000766667

Moody

f= 0.0185

anggap turbulen sempurna

$$h_f = \frac{8 \cdot f \cdot L}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \cdot Q^2$$

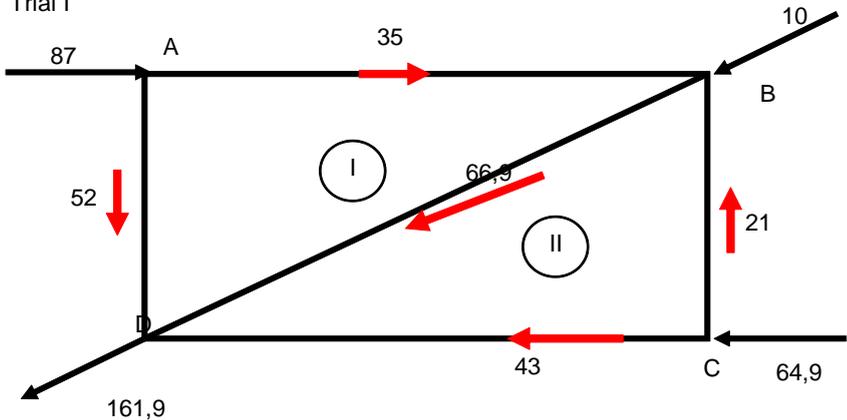
$$K_{AB} = \frac{8 \cdot f \cdot L}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \cdot 0.062$$

Pada jejaring pipa dengan metode Hardy Cross nilai K disederhanakan menjadi:

$$\begin{array}{rcl} K_{AB} = & 6,2 & K_{AD} = 6 \\ K_{BD} = & 2 & K_{BC} = 1 \\ K_{CD} = & 1 & \end{array}$$

Hitungan Jejaring Pipa dengan Metode Hardy Cross

Trial I



Cara trial dimulai dari titik D (yang besar) diperoleh:

$$\frac{1}{\sqrt{K_{AD}}} : \frac{1}{\sqrt{K_{DB}}} : \frac{1}{\sqrt{K_{DC}}}$$

$$\frac{1}{\sqrt{6}} : \frac{1}{\sqrt{2}} : \frac{1}{\sqrt{5}} = 4,1 : 7,1 : 4,5$$

$$\text{Total} = 15,7$$

$$Q_{AD} = \frac{4,1}{15,7} \cdot 161,9 = 42$$

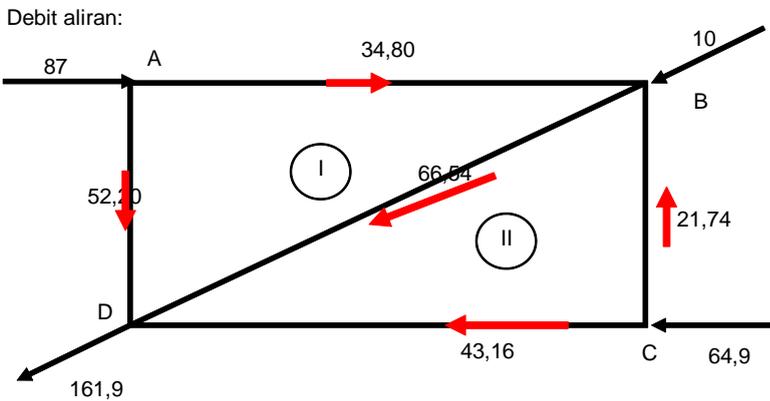
$$Q_{DB} = \frac{7,1}{15,7} \cdot 161,9 = 73$$

$$Q_{DC} = \frac{4,5}{15,7} \cdot 161,9 = 46$$

Berdasarkan hasil trial maka diperoleh debit aliran pada masing-masing pipa adalah:

Maka Debit Aliran masing-masing Pipa:

| | | ΔQ_1 | ΔQ_2 | Q | Satuan |
|--------|-------|--------------|--------------|--------------|--------|
| Q(AB)= | -0.24 | 0.05 | 0.09 | -0.20 | cfs |
| Q(AD)= | 0.24 | 0.05 | 0.09 | 0.20 | cfs |
| Q(BD)= | 66.41 | 0.05 | 0.09 | 66.54 | cfs |
| Q(CD)= | 43.25 | 0.05 | 0.09 | 43.16 | cfs |
| Q(CB)= | 21.65 | 0.05 | 0.09 | 21.74 | cfs |



Analisis Permodelan dititik B:

Model di B

Dalam soal ini kekentalan kinematik sangat berpengaruh maka dipakai model Reynolds Number

$$(R_e)_M = (R_e)_P$$

$$\left(\frac{V.L}{\nu}\right)_M = \left(\frac{V.L}{\nu}\right)_P \quad \left(\frac{V_M}{V_P}\right) = \frac{\nu_M}{\nu_P} \cdot \frac{L_P}{L_M} \quad \left(\frac{V_M}{V_P}\right) = \frac{5.10^{-6}}{1.0910^{-5}} \cdot \frac{10}{1} \quad 4.58$$

$$\left(\frac{A_M}{A_P}\right) = \frac{L_M^2}{L_P^2} \quad \left(\frac{A_M}{A_P}\right) = 0.01$$

$$Q = A.V$$

$$(Q)_M = 0.0458 (Q)_P$$

Jadi Debit aliran pada Model adalah:

| Pipa | Debit | Satuan |
|----------------------|-----------------|--------|
| AB | 1.59 | cfs |
| CB | 1.00 | cfs |
| BD | 3.05 | cfs |
| Simpul dari luar (B) | 0.46 (0.458) | cfs |

DAFTAR PUSTAKA

- Bijker, e.w., 1965, Determination of Scales of Movable Bed Models Experimental Hydraulics Research, Delft Hydraulics Laboratory, The Netherland.
- Guy, H.P., D.M. Simons and E. V. Richardson, 1966, Summary of Alluvial Channel data from flume Experiments 1956-61, U. S. Geol. Survey Prof. Paper 462-I.
- Lab. Teknik Pantai, 1982, Uji model fisik stabilitas pemecah gelombang Pelabuhan Pulau Baai, Bengkulu, bekerjasama dengan Fakultas Teknik UGM , Yogyakarta.
- Langhaar, H. L., 1957, Dimensional analysis and theory of models, 166p., New York.
- Nur Yuwono, 1994, Personal Approach.
- Sharp, J. J., 1981, Hydraulics Modelling, Butterworths & Co; London.

Velinga, P., 1982, Beach and dune erosion during storm surges, Coastal Engineering Vol. 6, No.4.

Vries, M.de and J. J. van der Zward, 1975, Mobile-bed river-models, Proc. ASCE Symposium on Modelling Techniques, San Francisco, September.

Vries, M.de, 1977, Scale Models in Hydraulics Engineering, International Institute for Hydraulics and Environmental Engineering IHE, Delft, The Netherlands.