

**SURAT TUGAS****Nomor : 55/F.Saintek-UTY/TS/VI/2022**

Yang bertandatangan dibawah ini :

Nama : Adwiyah Asyifa, S.T.,M.Eng.  
NIK : 110116081  
Jabatan : Ketua Program Studi Teknik Sipil  
Perguruan Tinggi : Universitas Teknologi Yogyakarta

Dengan ini memberi tugas kepada :

Nama : Puji Utomo, S.T., M.Eng.  
NIK : 110517103  
Prodi : Teknik Sipil  
Perguruan Tinggi : Universitas Teknologi Yogyakarta

Untuk melaksanakan tugas menyusun buku diktat kuliah untuk mata kuliah Hidraulika pada Semester Ganjil Tahun Ajaran 2022/2023.

Demikian surat tugas ini diberikan untuk dilaksanakan sebaik - baiknya.

Yogyakarta, 07 Juni 2022

Ketua Program Studi Teknik Sipil

Adwiyah Asyifa, S.T., M.Eng.

NIK : 110116081

Untuk Kalangan Sendiri



Modul Kuliah

# Hidraulika



Puji Utomo

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kepada Allah SWT, karena atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya Buku Modul Mata Kuliah Hidraulika (3 SKS) bagi mahasiswa khususnya mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Teknologi Yogyakarta ini dapat diselesaikan.

Buku modul kuliah ini merupakan rangkuman dari beberapa buku referensi yang kemudian disusun ke dalam 6 Bab. Bab 1 dari buku ini membahas terkait sifa-sifat zat cair. Bab 2 mempelajari tentang prinsip hidrostatis pada zat cair. Dilanjutkan pada Bab 3, mengenai persamaan aliran yang terdiri dari persamaan kontinuitas, energi, dan momentum. Bab 4 membahas mengenai aliran melalui lubang dan peluap, sedangkan Bab 5 mempelajari aliran melalui saluran pipa. Bab 6 membahas terkait aliran melalui saluran terbuka.

Buku modul kuliah ini disusun dengan tujuan untuk membantu mahasiswa di dalam mengikuti dan memahami materi kuliah Hidraulika. Untuk mempermudah pemahaman teori yang diberikan, setiap materi yang dibahas dilengkapi latihan soal di akhir Bab, yang akan dibahas di kelas atau sebagai latihan di rumah. Dengan adanya buku ini diharapkan mahasiswa akan bisa mempelajari lebih teratur dan mendalam atas materi yang diberikan dalam kuliah. Selain itu diharapkan mahasiswa dapat mempelajari terlebih dahulu materi yang akan diberikan, sehingga pada saat kuliah akan dapat lebih mudah memahami penjelasan yang diberikan oleh dosen.

Buku modul kuliah ini bersifat “dinamis” yang senantiasa dapat diperbaiki, diperbaharui dan dimuktakhirkan sebagai bagian dari penyempurnaan buku ini. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan saran, kritik dan koreksi dari para pembaca. Akhir kata, semoga buku modul kuliah ini dapat bermanfaat.

Yogyakarta, Agustus 2022

Puji Utomo

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN SAMPUL</b> .....	i
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	ii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	iii
<b>BAB 1 SIFAT – SIFAT ZAT CAIR</b> .....	1
A. Rapat Massa, Berat Jenis, dan Rapat Relatif.....	1
B. Kemampatan Zat Cair.....	1
C. Kekentalan (Viskositas) Zat Cair.....	2
D. Tegangan Permukaan.....	3
E. Daya Kapilaritas.....	3
F. Tekanan Uap.....	4
G. Latihan Soal.....	5
<b>BAB 2 HIDROSTATIKA</b> .....	10
A. Tekanan Hidrostatik.....	10
B. Alat Pengukur Tekanan Hidrostatik.....	11
C. Gaya Hidrostatik pada Bidang Terendam.....	13
D. Latihan Soal.....	15
<b>BAB 3 PERSAMAAN ALIRAN</b> .....	19
A. Klasifikasi Aliran.....	19
B. Persamaan Aliran.....	22
C. Latihan Soal.....	24
<b>BAB 4 ALIRAN MELALUI LUBANG DAN PELUAP</b> .....	31
A. Aliran melalui Lubang.....	31
B. Aliran melalui Peluap.....	31
C. Latihan Soal.....	37
<b>BAB 5 ALIRAN MELALUI PIPA</b> .....	43
A. Kehilangan Tenaga Aliran Melalui Pipa.....	43
B. Rumus Empirik Aliran melalui Pipa.....	48
C. Sistem Perpipaan.....	49
D. Latihan Soal.....	54
<b>BAB 6 ALIRAN MELALUI SALURAN TERBUKA</b> .....	61
A. Kedalaman Aliran Seragam.....	61
B. Energi Spesifik.....	62
C. Loncat Air.....	64

D. Profil Muka Air.....	67
E. Latihan Soal.....	72
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>79</b>

# BAB 1

## SIFAT – SIFAT ZAT CAIR

Perilaku zat cair, terutama air, banyak dipelajari dalam bidang teknik sipil. Beberapa sifat zat cair khususnya air, diantaranya:

- Apabila ruangan lebih besar dari volume zat cair, akan terbentuk permukaan bebas horizontal yang berhubungan dengan atmosfer
- Memiliki rapat massa/massa jenis dan berat jenis
- Dapat dianggap sebagai zat yang tidak termampatkan (*incompressible*)
- Memiliki viskositas (kekentalan)
- Memiliki kohesi, adhesi, dan tegangan permukaan

Di antara sifat-sifat tersebut, yang penting untuk dibahas dalam buku diktat ini, diantaranya:

### A. Rapat Massa, Berat Jenis, dan Rapat Relatif

**Rapat massa** atau **massa jenis** didefinisikan sebagai massa zat cair tiap satuan volume pada temperatur dan tekanan tertentu.

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{kg}{m^3} \dots\dots\dots(1)$$

M adalah massa yang menempati volume V. Rapat massa air pada suhu 4°C dan tekanan atmosfer standard adalah 1000 kg/m<sup>3</sup> (SI).

**Berat Jenis** didefinisikan sebagai berat benda tiap satuan volume pada temperatur dan tekanan tertentu.

$$\gamma = \rho g = \frac{Mg}{V} = \frac{W}{V} = \frac{N}{m^3} \dots\dots\dots(2)$$

Berat jenis air pada suhu 4°C dan tekanan atmosfer standard adalah 9,81 kN/m<sup>3</sup> (SI).

**Rapat relatif** didefinisikan sebagai perbandingan antara rapat massa suatu zat dan rapat massa air pada 4°C dan tekanan atmosfer.

$$S = \frac{\rho_{zat\ cair}}{\rho_{air}} = \frac{\gamma_{zat\ cair}}{\gamma_{air}} \dots\dots\dots(3)$$

Bilangan ini tidak berdimensi

### B. Kemampatan Zat Cair

Kemampatan zat cair didefinisikan sebagai perubahan (pengecilan) volume karena adanya perubahan (penambahan) tekanan. Perbandingan tersebut dikenal dengan modulus elastisitas (K) dalam N/m<sup>2</sup>, sebagaimana ditunjukkan pada persamaan berikut:

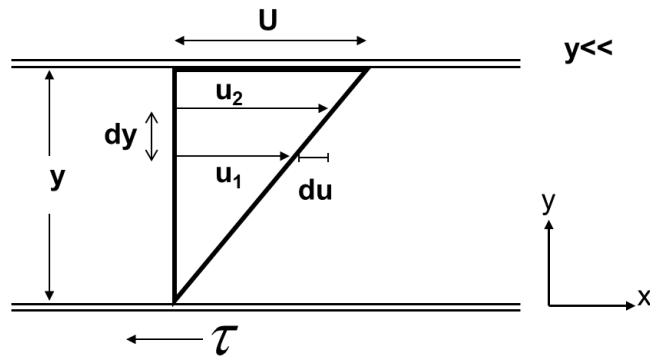
$$K = - \frac{dp}{\left(\frac{dV}{V}\right)} \dots\dots\dots(4)$$

dimana dp adalah pertambahan tekanan (Pa = N/m<sup>2</sup>) dan dV adalah pengurangan volume (m<sup>3</sup>) dari volume awal (V) (dalam m<sup>3</sup>). Tanda negatif menunjukkan pengurangan volume.

Nilai K untuk zat cair adalah sangat besar, tetapi perubahan volume karena perubahan tekanan adalah sangat kecil, sehingga perubahan volume sering diabaikan dan zat cair dianggap sebagai zat yang tak termampatkan (*incompressible*).

C. Kekentalan (Viskositas) Zat Cair

Sifat dari zat cair untuk melawan tegangan geser pada waktu bergerak atau mengalir. Kekentalan disebabkan karena kohesi antara partikel zat cair. Gambar 1.1. menunjukkan zat cair yang terletak diantara dua plat sejajar yang berjarak sangat kecil ( $y \ll$ ). Plat bagian bawah adalah diam sedangkan plat atas bergerak dengan kecepatan U.



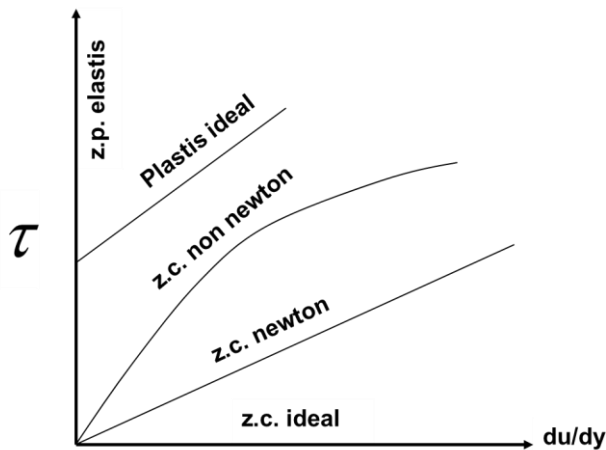
Gambar 1.1 Deformasi zat cair akibat viskositas

Tegangan geser antara dua lapis zat cair adalah sebanding dengan gradien kecepatan dalam arah tegak lurus dengan gerak ( $du/dy$ )

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \dots\dots\dots(6)$$

Dengan  $\mu$  adalah kekentalan dinamik ( $Nd/m^2$ ) dan  $\tau$  adalah tegangan geser ( $N/m^2$ ).

Zat cair yang memiliki hubungan linier antara tegangan geser dan gradien kecepatan disebut zat cair Newton (Gambar 1.2.).



Gambar 1.2. Hubungan antara tegangan geser dan gradien kecepatan

Dalam beberapa masalah mengenai gerak zat cair, digunakan istilah kekentalan kinematik, yaitu: Kekentalan absolut dihubungkan dengan rapat massa yang dinyatakan dalam ( $m^2/d$ ) sebagaimana ditunjukkan sebagai berikut:

$$v = \frac{\mu}{\rho} \dots\dots\dots(7)$$

D. Tegangan Permukaan

Molekul - molekul zat cair saling tarik menarik secara setimbang. Pada permukaan zat cair atau pada batas antara zat cair dan udara gaya tarik menarik (ke atas ke bawah) tidak setimbang, sehingga timbul suatu bentuk permukaan (Gambar 1.3.). Kerja untuk melawan gaya tarik ke bawah dikenal tegangan permukaan

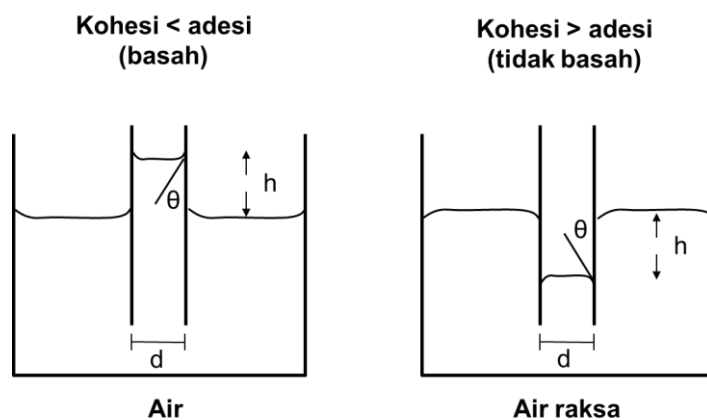


Gambar 1.3. Gaya-gaya molekul di dalam zat cair

Besarnya gaya tegangan permukaan adalah sangat kecil dibanding dengan gaya-gaya lain yang bekerja pada zat cair, sehingga biasanya dapat diabaikan.

E. Daya Kapilaritas

Kapilaritas disebabkan oleh gaya kohesi dan adhesi. Di dalam suatu tabung yang dimasukkan ke dalam zat cair, jika kohesi lebih kecil dari adhesi maka zat cair akan naik, dan jika kohesi lebih besar dari adhesi maka zat cair akan turun, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.4.



Gambar 1.4. Kapilaritas pada air dan air raksa

Kenaikan kapiler (atau penurunan) dapat dihitung melalui prinsip keseimbangan gaya angkat oleh tegangan permukaan = gaya berat (Lihat Gambar 1.4.).

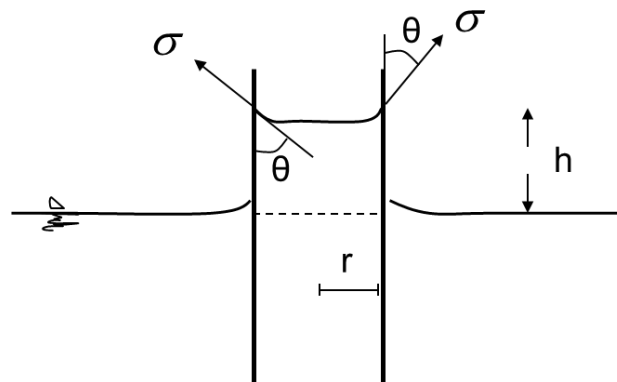
$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\gamma r} \dots\dots\dots(8)$$

Dengan:

- $\sigma$  : tegangan permukaan (N/m)
- $\gamma$  : berat jenis zat cair (N/m<sup>3</sup>)
- r : jari – jari tabung (m)
- h : kenaikan kapiler (m)



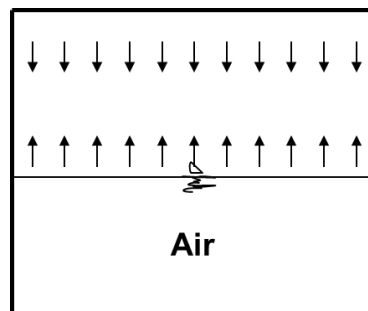
Apabila tabung bersih,  $\theta = 0^\circ$  untuk air dan  $140^\circ$  untuk air raksa



Gambar 1.5. Gaya – gaya pada kapilaritas

#### F. Tekanan Uap

Zat cair yang terbuka pada gas akan mengalami penguapan. Penguapan terjadi karena molekul zat cair selalu bergerak. Laju penguapan tergantung pada perbedaan energi molekul antara zat cair dan gas yang ada di atasnya. Pada kondisi tertentu, penguapan  $\gg$  molekul zat cair ke udara = molekul uap ke air  $\rightarrow$  akan terjadi keseimbangan (Gambar 1.6.).



Gambar 1.6. Keseimbangan saat terjadi penguapan

Tekanan pada molekul zat cair  $\rightarrow$  tekanan uap jenuh. Tekanan uap jenuh untuk berbagai zat cair pada temperatur  $20^\circ\text{C}$  diberikan dalam Tabel 1.1.

Tabel 1.1. Tekanan uap jenuh untuk berbagai zat cair

Zat cair	Tekanan uap jenuh	
	kgf / cm <sup>2</sup>	N / m <sup>2</sup>
Air Raksa	$1,63 \times 10^{-6}$	0,160
Minyak Tanah	$3,36 \times 10^{-2}$	3,300
Alkohol	$5,95 \times 10^{-2}$	5,900
Bensin	$10,10 \times 10^{-2}$	10,000

Tabel 1.2. memberikan beberapa sifat zat cair khususnya air pada tekanan atmosfer dan pada beberapa temperatur.

Tabel 1.2. Sifat-sifat air pada tekanan atmosfer

Temp °C	Kerapatan $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Viscositas dinamis $\mu$ (m <sup>2</sup> /det)	Viscositas kinematis $\nu$ (m <sup>2</sup> /det)	Tegangan permukaan $\tau$ (N/m)	Tinggi tekanan uap $p_u/\gamma$ (m)	Modulus elastisitas K (N/m <sup>2</sup> )
0	999,87	1,787x10 <sup>-3</sup>	1,787x10 <sup>-6</sup>	0,0757	0.06	1,98x10 <sup>9</sup>
1	999,93	1,728 x10 <sup>-3</sup>	1,728 x10 <sup>-6</sup>	0,0755		
2	999,97	1,671 x10 <sup>-3</sup>	1,671 x10 <sup>-6</sup>	0,0753		
3	999,99	1,618 x10 <sup>-3</sup>	1,618 x10 <sup>-6</sup>	0,751		
4	1000	1,567 x10 <sup>-3</sup>	1,567 x10 <sup>-6</sup>	0,0749		
5	999,99	1,519 x10 <sup>-3</sup>	1,159 x10 <sup>-6</sup>	0,0748	0.09	2,03x10 <sup>9</sup>
6	999,97	1,472 x10 <sup>-3</sup>	1,472 x10 <sup>-6</sup>	0,0747		
8	999,88	1,386 x10 <sup>-3</sup>	1,386 x10 <sup>-6</sup>	0,0745		
10	999,73	1,307 x10 <sup>-3</sup>	1,307 x10 <sup>-6</sup>	0,0742	0.12	2,09x10 <sup>9</sup>
12	999,52	1,234 x10 <sup>-3</sup>	1,235 x10 <sup>-6</sup>	0,0740		
14	999,27	1,168 x10 <sup>-3</sup>	1,169 x10 <sup>-6</sup>	0,0737		2,14x10 <sup>9</sup>
16	998,97	1,108 x10 <sup>-3</sup>	1,109 x10 <sup>-6</sup>	0,0734		

G. Latihan Soal

1. Suatu tangki berisi zat cair dengan massa 1.200 kg dan volume 0,952 m<sup>3</sup>. Hitung berat, rapat massa, berat jenis, dan rapat relatif zat cair.

Lembar Jawaban:

2. Minyak mempunyai rapat relatif  $S = 0,7$ . Hitung berat jenis dan rapat massa.

Lembar Jawaban:

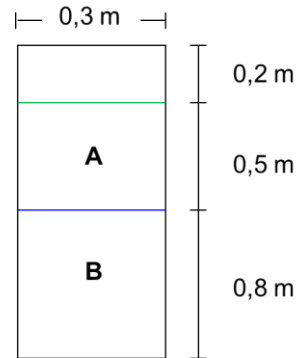
3. Modulus elastisitas air adalah  $K = 2,24 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ . Hitung perubahan volume dari  $1 \text{ m}^3$  air bila terjadi penambahan tekanan sebesar 20 bar.

Lembar Jawaban:

4. Apabila modulus elastisitas air,  $K = 210.000 \text{ N/cm}^2$ . Berapa kenaikan tekanan yg diperlukan untuk mereduksi volume sebesar 2 %. Berapa perubahan rapat massa yang terjadi ?

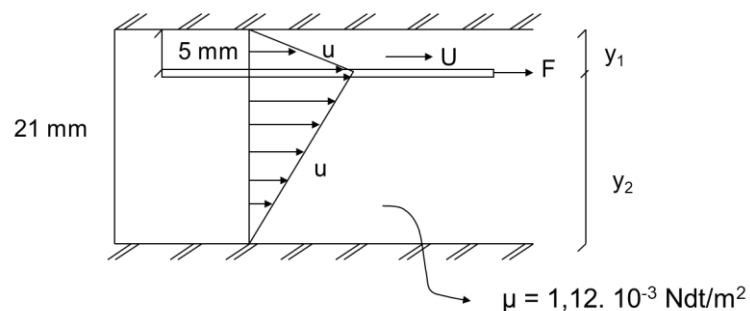
Lembar Jawaban:

5. Tangki baja berbentuk silinder berisi minyak A dan air B. Di atas minyak terdapat udara, dimana tekanannya bisa diubah-ubah. Pada tekanan atmosfer tinggi minyak A dan air B diperlihatkan pada gambar. Apabila tekanan dinaikkan 1 Mpa, berapa penurunan permukaan air & minyak, bila diketahui :  $K_{\text{air}} = 2075 \text{ MN/m}^2$ ;  $K_{\text{minyak}} = 2050 \text{ MN/m}^2$  dianggap tangki tidak berubah akibat tekanan.



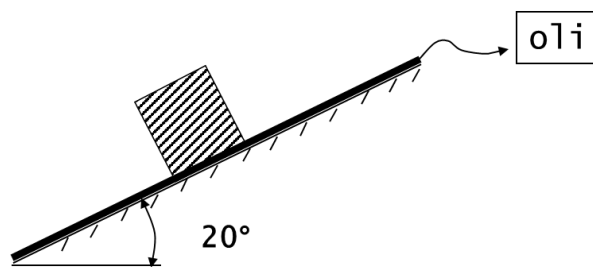
Lembar Jawaban:

6. Hitung viskositas kinematik zat cair yang mempunyai rapat relatif 0,95 dan viskositas dinamik  $0,0011 \text{ N s/m}^2$ . Ukuran plat:  $200 \times 200 \text{ mm}^2$ ; tebal: 1 mm. Tentukan gaya agar plat bergerak dengan kecepatan,  $U = 125 \text{ mm/dt}$ .



Lembar Jawaban:

7. Suatu benda dengan berat,  $W = 1 \text{ kN}$ , dengan ukuran  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ , diluncurkan pada bidang miring (spt pada gambar) yang dilapisi oli dengan tebal  $0.005 \text{ mm}$ . Hitung kecepatan gerakan benda tersebut. Viskositas oli;  $\mu = 7.10^{-3} \text{ N.s/m}^2$



Lembar Jawaban:

8. Tabung gelas berdiameter 5 mm dimasukkan secara vertikal ke dalam air. Hitung kenaikan kapiler apabila tegangan permukaan sebesar 0,0736 N/m. Tabung adalah bersih.

Lembar Jawaban:

9. Tabung gelas berdiameter 2 mm berisi air raksa dimasukkan ke dalam berisi air raksa. Tegangan permukaan air raksa sebesar  $480 \times 10^{-3}$  N/m dan sudut kontak  $\theta = 45^\circ$ . Hitung penurunan permukaan air raksa dalam tabung. Rapat relatif air raksa  $S = 13,6$ .

Lembar Jawaban:

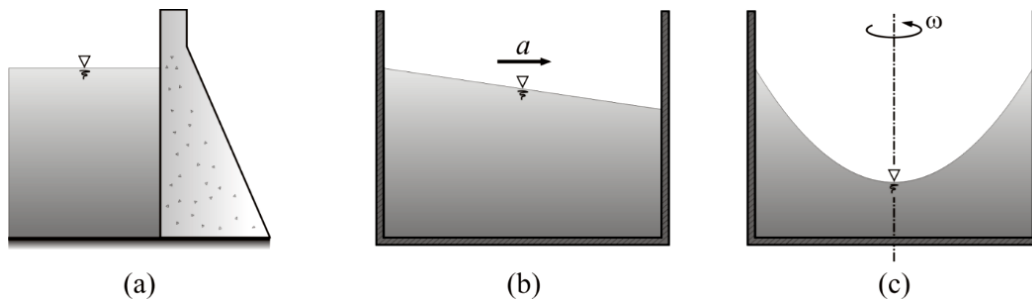
## BAB 2 HIDROSTATIKA

Hidrostatika merupakan cabang dari ilmu hidraulika yang mempelajari perilaku zat cair dalam keadaan statis. Dalam bab ini akan dipelajari beberapa hal, seperti: tekanan hidrostatik, alat pengukur tekanan hidrostatik, gaya hidrostatik, serta aplikasinya yang ada pada permasalahan di bidang Teknik Sipil.

### A. Tekanan Hidrostatik

Tekanan hidrostatik terjadi pada fluida (zat cair) dalam kondisi statis. Ada 3 kondisi fluida (zat cair) dikatakan statis meliputi (ditunjukkan pada Gambar 2.1):

1. Fluida diam dalam suatu reservoir,
2. Fluida dalam suatu perangkat yang mengalami percepatan linear
3. Fluida dalam silinder yang diputar dengan kecepatan tinggi



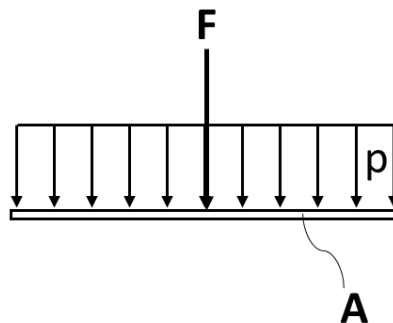
Gambar 2.1. Beberapa kondisi fluida (zat cair) statis

(a) kondisi diam (b) kondisi mengalami percepatan linier (c) pada silinder yang diputar dengan kecepatan tinggi

Tekanan didefinisikan sebagai jumlah gaya tiap satuan luas. Apabila gaya terdistribusi merata pada suatu luasan, maka tekanan dapat ditentukan dengan membagi gaya dengan luas.

$$p = \frac{F}{A} \dots\dots\dots(9)$$

dimana: P adalah Tekanan (N/m<sup>2</sup>), F adalah Gaya (N), dan A adalah luas (m<sup>2</sup>)



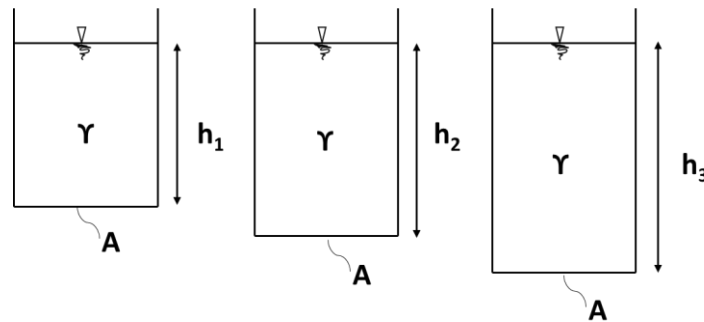
Gambar 2.2. Ilustrasi gaya terdistribusi pada suatu bidang

Beberapa satuan tekanan yang sering digunakan, baik secara Internasional maupun lainnya disertai dengan faktor konversinya dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Satuan tekanan dan faktor koreksinya

Nama satuan	Satuan	Konversi
Pascal	Pa	1 Pa = 1 N/m <sup>2</sup>
Bar	bar	1 bar = 0.1 Mpa
Tekanan atmosfer	atm	1 atm = 101 325 Pa
Tinggi kolom air	mH <sub>2</sub> O	1 mH <sub>2</sub> O = 9.807 Pa
Tinggi kolom air raksa	mHg	1 mHg = 1/0.76 atm
Torr	torr	1 torr = 1 mm Hg

Lihat ilustrasi beberapa tangki berisi zat cair yang sama dalam keadaan diam. Kedalaman zat cair adalah  $h_1$ ,  $h_2$ , dan  $h_3$ . Luas dasar semua tangki adalah sama yaitu  $A$ .



Gambar 2.3. Ilustrasi tangki dengan kedalaman berbeda

Dari ilustrasi gambar di atas, menunjukkan bahwa tekanan  $p$  hanya tergantung pada variabel  $h$  (kedalaman zat cair)  $\rightarrow p = f(h)$ , ditulis dalam bentuk:

$$p = \gamma h \text{ atau } p = \rho g h \dots\dots\dots(10)$$

Tekanan  $p$  disebut dengan **tekanan hidrostatis**

Apabila di atas permukaan zat cair terdapat tekanan  $p_o$  maka tekanan yang bekerja pada dasar tangki adalah:

$$p = \gamma h + p_o \text{ atau } p = \rho g h + p_o \dots\dots\dots(11)$$

Apabila permukaan zat cair terbuka ke udara luar, tekanan di atas zat cair adalah tekanan atmosfer,  $p_o = p_a$  sehingga tekanan absolut adalah:

$$p = \gamma h + p_a \text{ atau } p = \rho g h + p_a \dots\dots\dots(12)$$

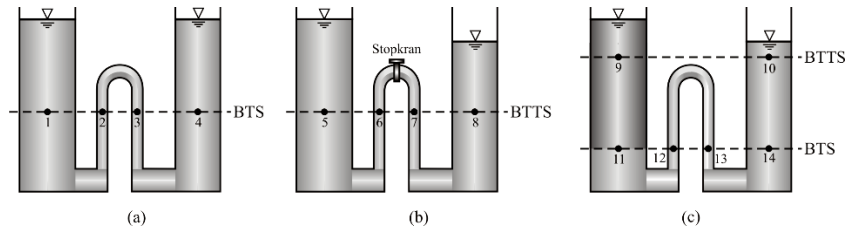
Untuk tekanan relatif atau terukur,  $p_a = 0$  sehingga :

$$p = \gamma h \text{ atau } p = \rho g h \dots\dots\dots(13)$$

### B. Alat Pengukur Tekanan Hidrostatis

Manometer merupakan alat yang menggunakan kolom zat cair untuk mengukur perbedaan tekanan. Prinsip manometer adalah apabila zat cair dalam kondisi seimbang maka tekanan di setiap titik pada bidang horizontal untuk zat cair homogen adalah sama. Sebagai ilustrasi, prinsip kerja manometer ditunjukkan pada Gambar 2.4.





Ket : BTS = Bidang dengan Tekanan Sama  
 BTTs = Bidang dengan Tekanan Tidak Sama

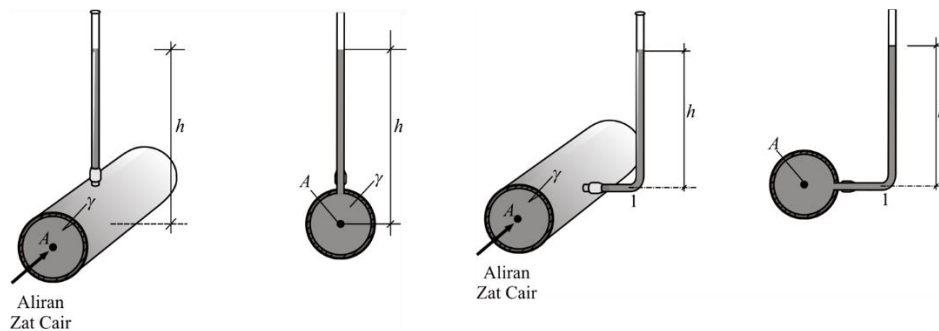
Gambar 2.4. Ilustrasi prinsip manometer pada tangki

Seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.4.a maka titik 1,2,3, dan 4 berada pada bidang horisontal dengan tekanan yang sama. Dalam Gambar 4.b, titik 5, 6, 7, dan 8 berada pada bidang horisontal, tetapi tekanan pada titik-titik tersebut tidak sama, karena air di dalam kedua tangki tidak berhubungan. Gambar 2.4.c menunjukkan tangki yang diisi dengan dua zat cair yang berbeda rapat massanya. Bidang horisontal yang melalui titik 11, 12, 13, dan 14 melalui batas antara kedua zat cair mempunyai tekanan yang sama karena berat kolom zat cair tiap satuan luas di atas titik-titik tersebut adalah sama. Sementara bidang yang melalui titik 9 dan 10 adalah bukan bidang dengan tekanan yang sama.

Beberapa jenis manometer yang sering digunakan sebagai alat pengukur tekanan hidrostatik, diantaranya:

1. Piezometer

Piezometer adalah merupakan jenis manometer paling sederhana, yang terdiri dari sebuah tabung vertikal terbuka yang dihubungkan dengan suatu ruang (pipa, tangki atau bejana) dimana tekanannya akan diukur.



Gambar 2.5. Ilustrasi bentuk piezometer

dimana h biasa disebut dengan tinggi tekanan, yang menunjukkan kedalaman zat cair yang diperlukan oleh zat cair dengan berat jenis/rapat massa untuk menghasilkan tekanan sebesar p. Tinggi tekanan (h) dapat ditulis sebagai:

$$h = \frac{P}{\gamma} \text{ atau } h = \frac{P}{\rho g} \dots\dots\dots(14)$$

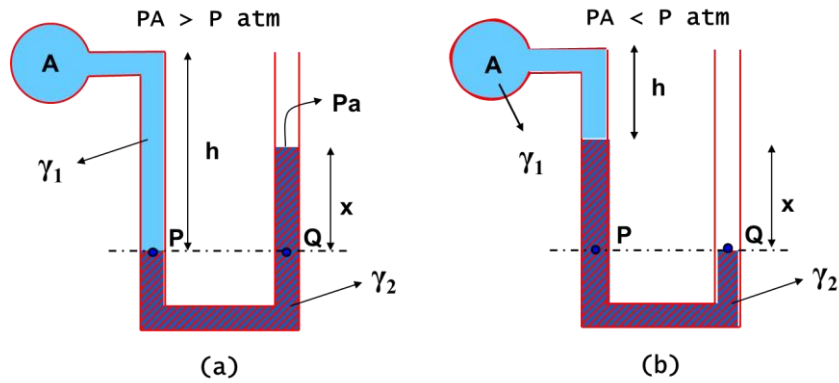
2. Manometer Tabung U

Manometer tabung U terdiri dari tabung kaca yang dihubungkan dengan ruangan (pipa) yang akan diukur tekanannya. Pada bidang horisontal P dan Q memiliki tekanan yang sama, sehingga terjadi persamaan keseimbangan yang dapat ditulis dalam bentuk:

$$p_A = p_a + \gamma_2 h - \gamma_1 x \text{ untuk kondisi Gambar 2.6.a} \dots\dots\dots(15)$$

$$p_A = p_a - \gamma_1 h + \gamma_2 x \text{ untuk kondisi Gambar 2.6.b} \dots\dots\dots(16)$$

dimana  $p_A$  adalah tekanan di titik A dan  $p_a$  adalah tekanan atmosfer.



Gambar 2.6. Ilustrasi Manometer Tabung U

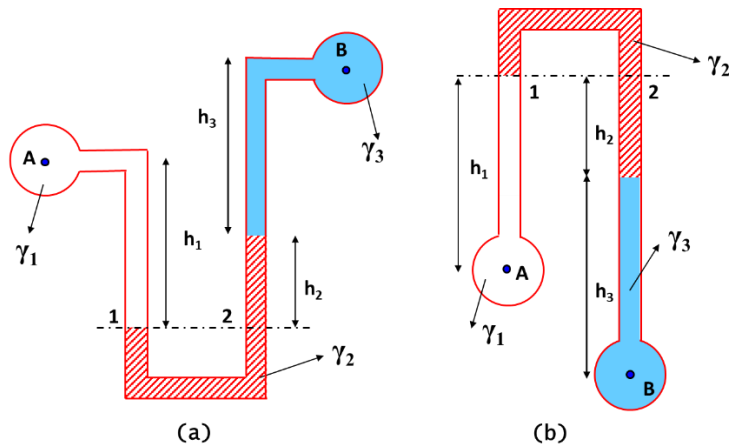
### 3. Manometer Diferensial

Manometer diferensial digunakan untuk mengukur perbedaan antara dua tekanan yang tidak diketahui besarnya. Pada kondisi keseimbangan berlaku:

$$p_A - p_B = h_2 \gamma_2 + (h_3 - h_1) \gamma_1 \text{ untuk kondisi Gambar 2.7.a} \dots\dots\dots(17)$$

$$p_A - p_B = h_1 \gamma_1 - h_2 \gamma_2 - h_3 \gamma_3 \text{ untuk kondisi Gambar 2.7.b} \dots\dots\dots(18)$$

dimana  $p_A$  adalah tekanan di titik A dan  $p_B$  adalah tekanan di titik B.



Gambar 2.7. Ilustrasi Manometer Diferensial

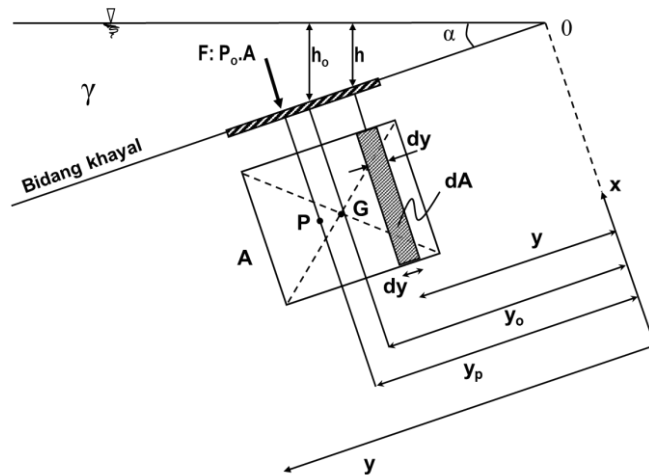
### C. Gaya Hidrostatik pada Bidang Terendam

Gaya hidrostatik didefinisikan sebagai hasil perkalian antara luas bidang  $x$  tekanan pada pusat berat yang bekerja tegak lurus dengan bidang  $\rightarrow$  dimana gaya hidrostatik itu bekerja pada pusat tekanan. Misal: Gaya hidrostatik bekerja pada pusat tekanan yang berjarak  $y_p$  dari sumbu  $x$  (titik  $o$ ), sehingga momen dari gaya hidrostatik terhadap  $o =$  jumlah momen dari gaya tekanan pada seluruh luasan terhadap titik  $o$ .

$$F = P_0 A \dots\dots\dots(19)$$

$$F = \gamma h_0 A \dots\dots\dots(20)$$

dimana  $F$  adalah gaya tekanan hidrostatik (N),  $A$  adalah luas bidang tekanan ( $m^2$ ),  $P_o$  adalah tekanan hidrostatik pada pusat berat bidang (Pa), dan  $h_o$  adalah jarak vertikal antara pusat berat benda dengan permukaan zat cair (m).



Gambar 2.8. Gaya tekanan pada bidang terendam

Gaya hidrostatik itu bekerja pada pusat tekanan yang berjarak  $y_p$ , dimana dapat ditentukan melalui persamaan berikut:

$$y_p = y_o + \frac{I_o}{Ay_o} \dots\dots\dots(21)$$

dimana  $y_p$  = jarak searah bidang dari pusat tekanan sampai pada muka zat cair,  $y_o$  = jarak searah bidang dari pusat berat sampai pada muka zat cair, dan  $I_o$  = momen inersia bidang A thd sumbu yg melalui pusat berat bidang tersebut.

Tabel 2.2. Momen Inersia ( $I_o$ ) untuk beberapa bentuk benda

	LUAS	PUSAT BERAT $Y_o$	MOMEN INERSIA $I_o$
	$b \cdot h$	$Y_o = \frac{1}{2} h$	$I_o = \frac{1}{12} bh^3$
	$\frac{1}{2} b \cdot h$	$Y_o = \frac{1}{3} h$	$I_o = \frac{1}{36} bh^3$
	$\frac{1}{4} \pi d^2$	$Y_o = \frac{1}{2} D$	$I_o = \frac{1}{64} \pi D^4$
	$\frac{1}{2} \pi r^2$	$Y_o = \frac{4r}{3\pi}$	$I_o = 0,1102 r^4$

#### D. Latihan Soal

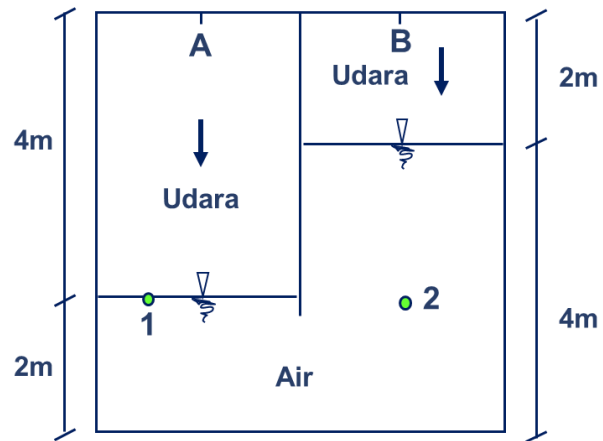
1. Tangki dengan ukuran panjang x lebar x tinggi (LBH) = 4 m x 2 m x 2 m diisi air sedalam 1,5 m. Hitung dan gambar distribusi tekanan pada dinding tangki.

Lembar Jawaban:

2. Suatu tangki dengan panjang 2,5 m, lebar 2 m dan tinggi 2 m diisi air sampai pada ketinggian 1,25 m dan sisanya diisi minyak sampai penuh dengan rapat relatif  $S = 0,9$ . Tangki tersebut terbuka ke udara luar. Hitung dan gambar distribusi tekanan pada dinding dan dasar tangki.

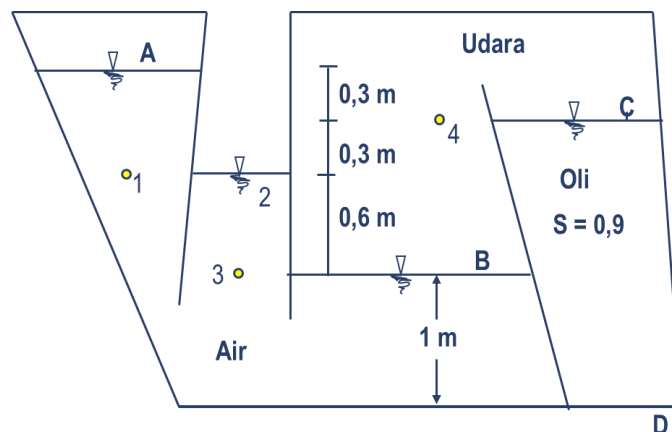
Lembar Jawaban:

3. Diketahui tekanan di titik A,  $P_A = 90000$  Pa. Tentukan tekanan di titik B bila: (a) Berat kolom udara tidak diabaikan (b) Berat kolom udara diabaikan.



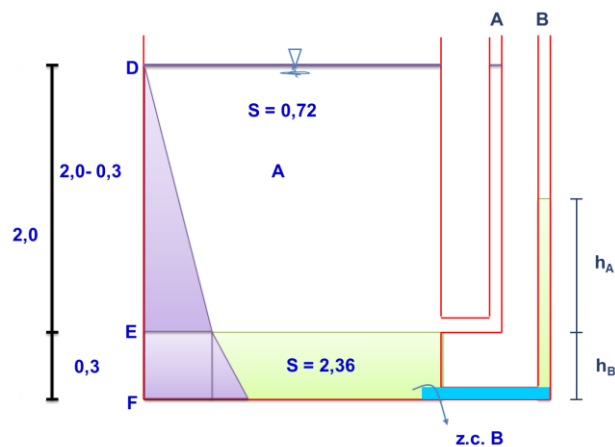
Lembar Jawaban:

4. Tentukan tekanan di titik A, B, C, D bila dianggap berat kolom udara dapat diabaikan.  
 Diketahui:  $\gamma_{\text{air}} = 9810 \text{ N/m}^3$  dan  $\gamma_{\text{oli}} = 0,9 \times 9810 = 8829 \text{ N/m}^3$ .



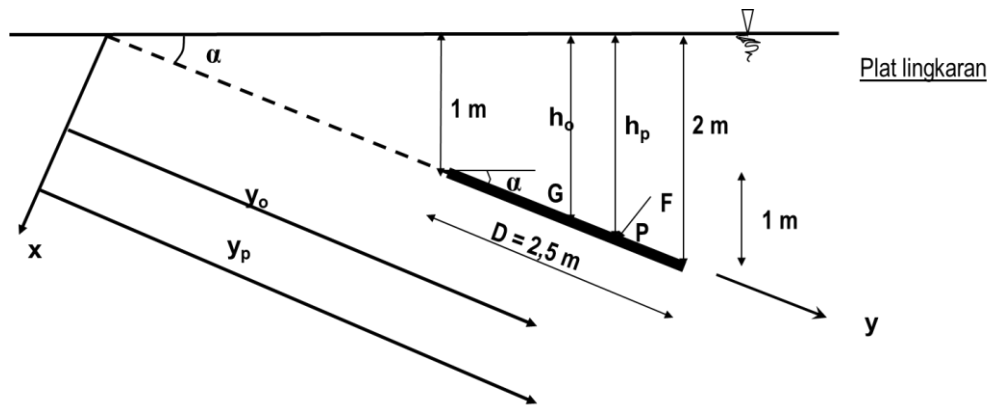
Lembar Jawaban:

5. Tentukan elevasi zat cair pada piezometer A, elevasi zat cair pada piezometer B, dan tekanan dasar & dinding.



Lembar Jawaban:

6. Hitung: Gaya hidrostatik pada plat dan letak pusat tekanan terhadap kondisi plat terendam sebagai berikut.



Lembar Jawaban:

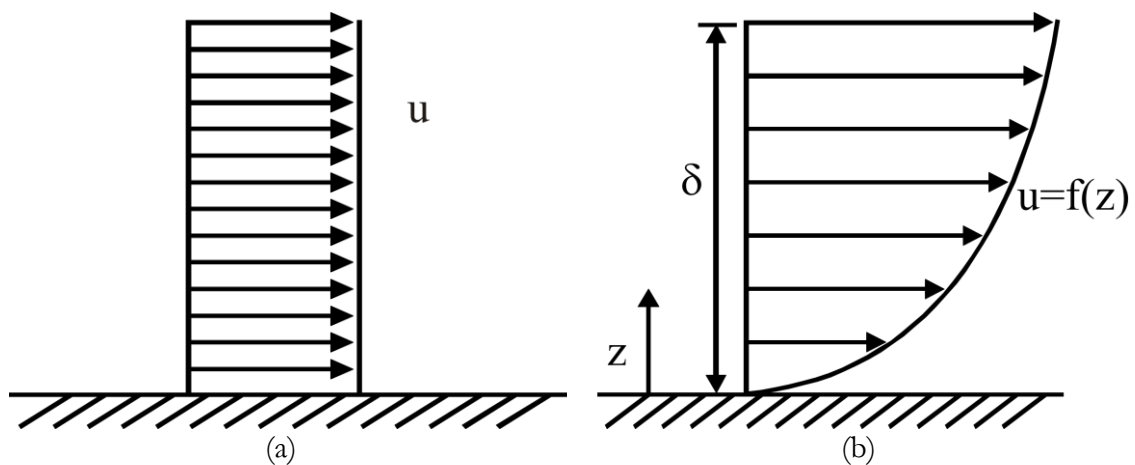
### BAB 3 PERSAMAAN ALIRAN

#### A. Klasifikasi Aliran

Aliran zat cair dapat diklasifikasikan menjadi beberapa macam seperti berikut:

1. Klasifikasi berdasarkan kekentalan (viskositas)
  - a. Aliran inviscid  $\rightarrow$  zat cair ideal, dimana viskositas ( $\mu$ ) = 0, tegangan geser ( $\tau$ ) = 0, dan kehilangan energi ( $h_f$ ) = 0.
  - b. Aliran viskos  $\rightarrow$  zat cair riil, dimana viskositas ( $\mu$ )  $\neq$  0, tegangan geser ( $\tau$ )  $\neq$  0, dan kehilangan energi ( $h_f$ )  $\neq$  0.

Lapis batas: bagian aliran yang dipengaruhi oleh kekasaran dinding ( $\delta$ )



Gambar 3.1. Distribusi kecepatan pada aliran zat cair  
(a) aliran inviscid (b) aliran viskos

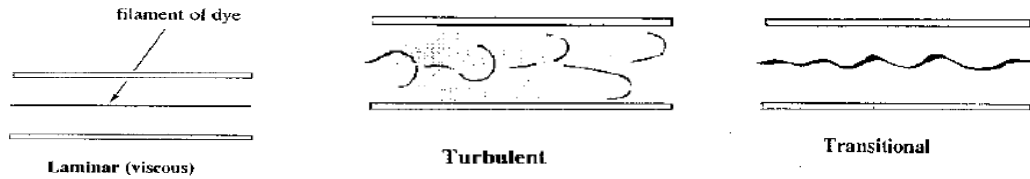
2. Klasifikasi berdasarkan kemampuan
  - a. Aliran kompresibel  $\rightarrow$  semua fluida kecuali zat cair
  - b. Aliran tak kompresibel  $\rightarrow$  aliran zat cair termasuk tak kompresibel karena hanya mengalami perubahan volume kecil walaupun diberikan perubahan tekanan yang sangat besar ( $\Delta P \gg 0$ ).
3. Klasifikasi berdasarkan angka Reynolds (pengaruh viskositas)
  - a. Aliran laminar  $\rightarrow Re < 2000$
  - b. Aliran turbulen  $\rightarrow Re > 4000$
  - c. Aliran transisi  $\rightarrow 2000 < Re < 4000$

Nilai angka Reynolds (Re) ditentukan melalui persamaan di bawah ini:

$$Re = \frac{\rho DV}{\mu} = \frac{VD}{\nu} \dots\dots\dots(22)$$

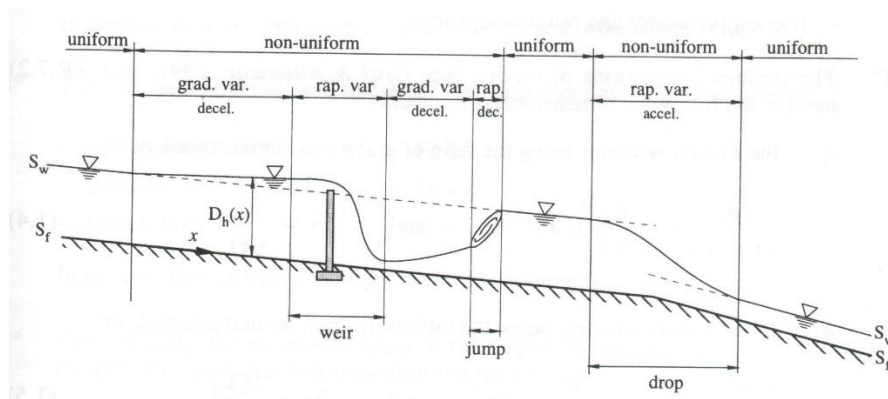
dimana  $\rho$  (rho) adalah rapat massa zat cair ( $kg/m^3$ ), D adalah diameter pipa (m), V adalah kecepatan aliran zat cair (m/s),  $\mu$  (mu) adalah kekentalan dinamik ( $Nd/m^2$ ),  $\nu$  (nu) adalah kekentalan kinematik ( $m^2/d$ ).





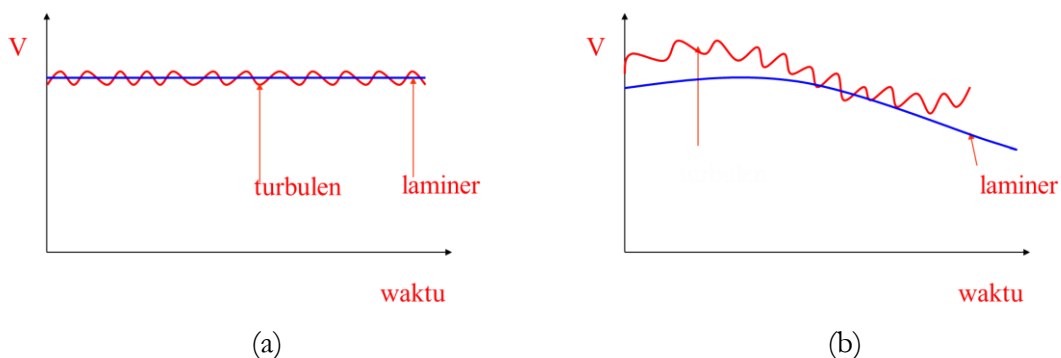
Gambar 3.2. Aliran laminer (a), turbulen (b), dan transisi (c)

4. Klasifikasi berdasarkan fungsi jarak/ruang
  - a. Aliran seragam (uniform flow) → apabila profil aliran pada setiap tampang saluran adalah sama. Misalnya: aliran di saluran panjang dengan debit dan penampang tetap.
  - b. Aliran tak seragam (non-uniform flow) → apabila profil aliran berubah sepanjang saluran. Aliran ini diklasifikasikan menjadi:
    - 1) Gradually varied flow → perubahan profil bertahap
    - 2) Rapidly varied flow → perubahan profil cepat, dalam jarak yang pendek



Gambar 3.3. Contoh profil aliran seragam dan tak seragam

5. Klasifikasi berdasarkan fungsi waktu
  - a. Aliran permanen (steady flow) → apabila profil aliran zat cair tidak berubah atau konstan sepanjang waktu tertentu.
  - b. Aliran tidak permanen (unsteady flow) → apabila profil aliran zat cair berubah sepanjang waktu tertentu.



Gambar 3.4. Kecepatan fungsi waktu untuk aliran permanen (a) dan tidak permanen (b).

6. Klasifikasi berdasarkan angka Froude (pengaruh gravitasi bumi)
  - a. Aliran subkritis → pengaruh kecepatan aliran lebih kecil daripada pengaruh gaya gravitasi ( $Fr < 1$ )

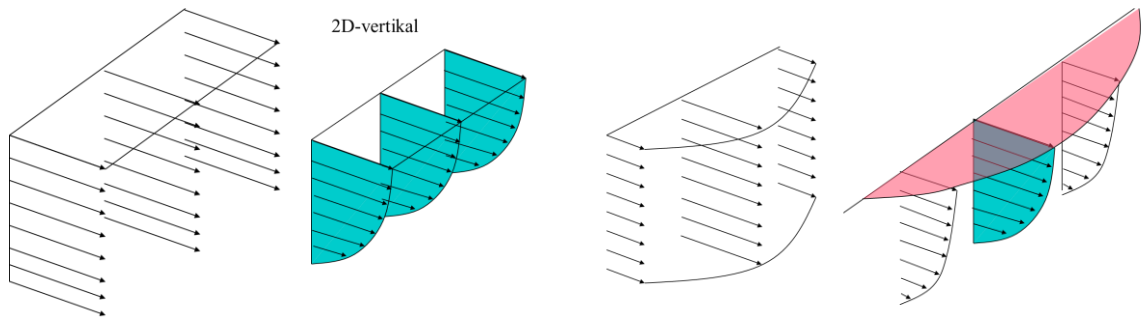
- b. Aliran kritis  $\rightarrow$  pengaruh kecepatan aliran sama dengan pengaruh gaya gravitasi ( $Fr = 1$ )
- c. Aliran superkritis  $\rightarrow$  pengaruh kecepatan aliran lebih besar daripada pengaruh gaya gravitasi ( $Fr > 1$ )

Jika ada perubahan jenis aliran dari superkritis ke sub-kritis maka akan terjadi loncat air, dan jika dari sub-kritis ke superkritis akan melewati aliran kritis. Nilai angka Froude ( $Fr$ ) ditentukan melalui persamaan di bawah ini:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \dots\dots\dots(23)$$

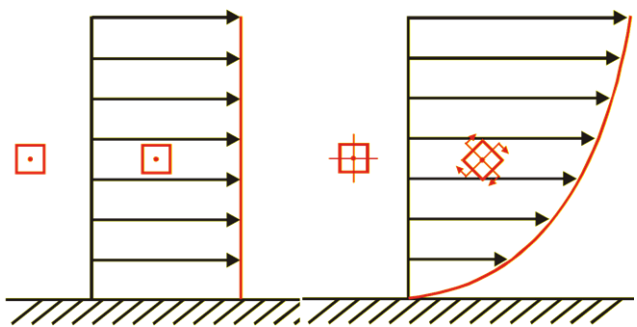
dimana  $V$  adalah kecepatan aliran zat cair (m/s),  $g$  adalah percepatan gravitasi ( $m/s^2$ ),  $h$  adalah kedalaman aliran (m).

- 7. Klasifikasi berdasarkan bentuk dimensi
  - a. Aliran satu dimensi (1-D)  $\rightarrow$  kecepatan di setiap titik pada tampang lintang memiliki besar dan arah yang sama.
  - b. Aliran dua dimensi (2-D)  $\rightarrow$  semua partikel dianggap mengalir dalam bidang sepanjang aliran, sehingga tidak ada aliran tegak lurus pada bidang tersebut.
  - c. Aliran tiga dimensi (3-D)  $\rightarrow$  komponen kecepatan  $u$ ,  $v$ , dan  $w$  adalah fungsi dari koordinat ruang  $x$ ,  $y$ , dan  $z$ .



Gambar 3.5. Aliran 1-D, 2-D, dan 3-D

- 8. Klasifikasi berdasarkan rotasi
  - a. Aliran rotasional  $\rightarrow$  apabila setiap partikel zat cair memiliki kecepatan sudut terhadap pusat massanya.
  - b. Aliran tak rotasional  $\rightarrow$  apabila partikel zat cair tidak berotasi terhadap pusat massanya.



Gambar 3.6. Aliran rotasional dan tak rotasional

## B. Persamaan Aliran

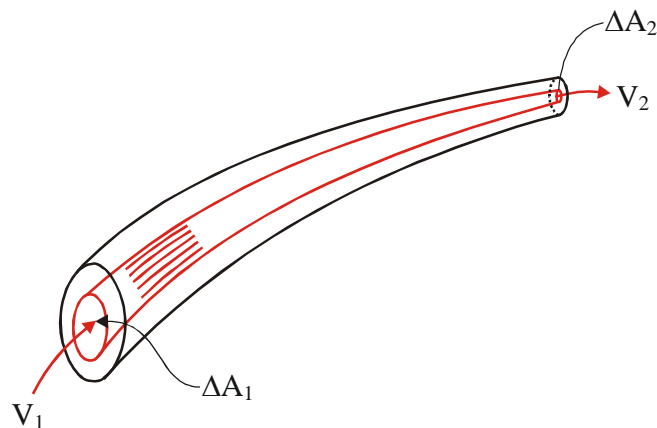
Tiga prinsip umum yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan dalam aliran zat cair baik pada sistem perpipaan maupun saluran terbuka, yaitu: persamaan konservasi massa (kontinuitas), persamaan konservasi energi (Bernoulli), dan persamaan konservasi momentum. Pada umumnya, persamaan kontinuitas dan prinsip energi dipandang telah cukup untuk menyelesaikan berbagai permasalahan khususnya pada aliran permanen dan seragam.

### 1. Persamaan Kontinuitas

Air merupakan fluida yang tidak termampatkan (*incompressible*) maka hukum kontinuitas massa dapat disederhanakan bahwa debit masuk = debit keluar, atau dapat ditulis sebagai:

$$Q_1 = Q_2 \rightarrow A_1V_1 = A_2V_2 \dots\dots\dots(24)$$

Dimana Q adalah debit (m<sup>3</sup>/s), A adalah luas tampang (m<sup>2</sup>), dan V adalah kecepatan aliran (m/s).



Gambar 7. Tabung aliran untuk menurunkan persamaan kontinuitas

Dari ilustrasi di atas, didapatkan bahwa debit yang mengalir pada suatu media tertentu (saluran terbuka, pipa, bercabang, tidak bercabang) mempunyai nilai sama ( $Q = \text{Konstan}$ ).

### 2. Persamaan Konservasi Energi (Bernoulli)

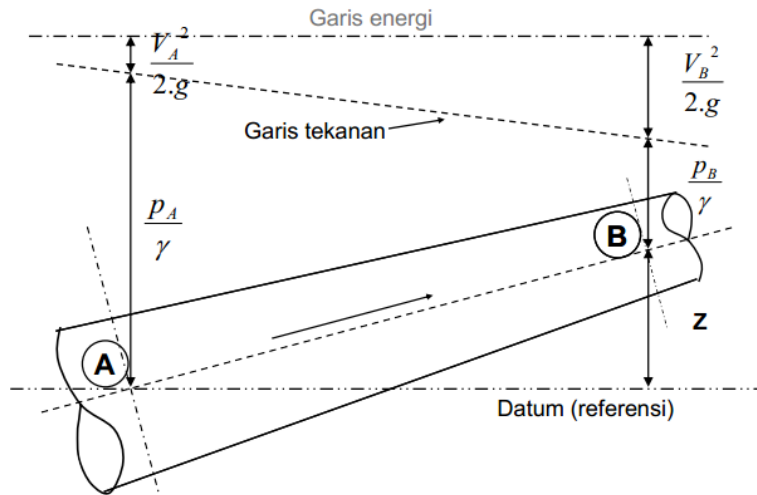
Persamaan Bernoulli merupakan bentuk matematis dari kekekalan energi di dalam aliran zat cair. Pada aliran mantap satu dimensi, zat cair ideal dan tak kompresibel berlaku persamaan:

$$z + \frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2.g} = \text{Konstan} \dots\dots\dots(25)$$

Pada zat cair ideal kehilangan energi primer dan sekunder diabaikan. Jika persamaan Bernoulli diaplikasikan untuk kedua titik di dalam medan aliran sebagaimana Gambar 3.8. akan memberikan persamaan:

$$z_A + \frac{p_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2.g} = z_B + \frac{p_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2.g} \dots\dots\dots(26)$$

dimana  $z_A, z_B$  adalah elevasi dasar;  $\frac{p_A}{\gamma}, \frac{p_B}{\gamma}$  adalah tinggi tekanan;  $V_A, V_B$  adalah kecepatan aliran; dan g adalah percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>).

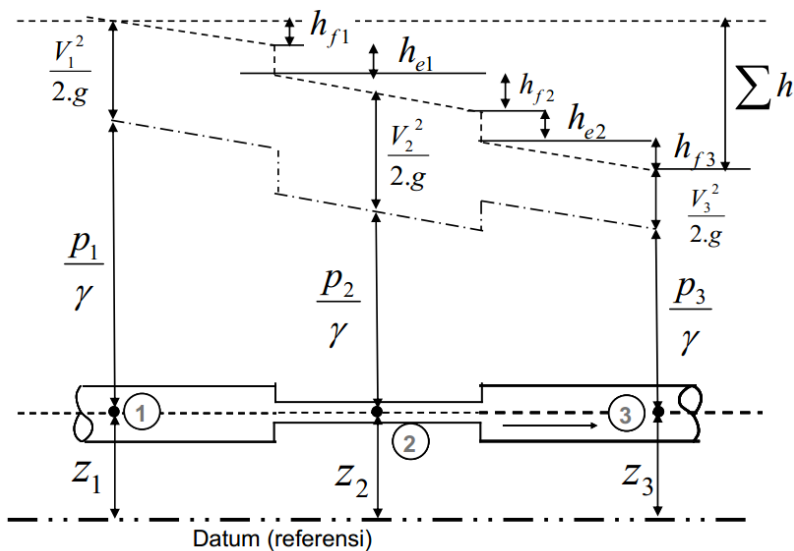


Gambar 3.8. Garis tekanan dan energi pada zat cair ideal

Untuk zat cair riil (mempunyai viskositas tertentu), maka perlu mempertimbangkan adanya kehilangan tenaga di sepanjang pipa baik primer maupun sekunder (Gambar 3.9).

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2.g} = z_3 + \frac{p_3}{\gamma} + \frac{V_3^2}{2.g} + \sum h_f + \sum h_e \dots\dots\dots(27)$$

dimana  $h_f$  merupakan kehilangan tenaga primer karena aliran mengalami gesekan dengan dinding pipa, sedangkan  $h_e$  merupakan kehilangan tenaga sekunder karena aliran mengalami gangguan (misalnya: akibat percabangan pipa, belokan pipa, sambungan dan sebagainya)



Gambar 3.9. Persamaan Bernoulli pada zat cair riil

Kehilangan tenaga primer dan sekunder dinyatakan dalam persamaan berikut ini:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2.g} \dots\dots\dots(28)$$

$$h_e = k \frac{V^2}{2.g} \dots\dots\dots(29)$$

dengan k adalah konstantas, V adalah kecepatan aliran (m/s), f adalah koefisien gesekan, L adalah panjang pipa (m), dan D adalah diameter pipa (m). Penjelasan lebih rinci tentang kehilangan tenaga akan diberikan dalam Bab 5 Aliran Melalui Pipa.

### 3. Persamaan Momentum

Momentum suatu partikel atau benda didefinisikan sebagai perkalian antara massa M dengan kecepatan V.

$$\text{Momentum} = Mv \dots\dots\dots(30)$$

Menurut hukum Newton II, perubahan momentum tersebut dapat menyebabkan terjadinya gaya, yang sebanding dengan laju perubahan momentum, sehingga dapat ditulis sebagai:

$$F = \rho Q dV \dots\dots\dots(31)$$

Apabila ditinjau tabung aliran yang dibatasi oleh tampang 1 dan 2, maka gaya yang bekerja pada zat cair di dalam tabung pipa adalah:

$$F = \rho Q(V_2 - V_1) \dots\dots\dots(32)$$

Dimana F adalah gaya (N), ρ adalah rapat massa (kg/m<sup>3</sup>), V adalah kecepatan aliran (m/s)

### C. Latihan Soal

1. Air mengalir melalui pipa berdiameter 120 mm dengan kecepatan 4,8 m/detik. Kekentalan kinematik air 1,3 x 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/detik. Selidiki tipe aliran.

Lembar Jawaban:

2. Pipa berdiameter 4 cm mengalirkan air pada 20<sup>0</sup>C. Hitung debit aliran maksimum di mana aliran adalah laminar. Kekentalan kinematik air pada temperatur tersebut adalah 1 x 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/detik.

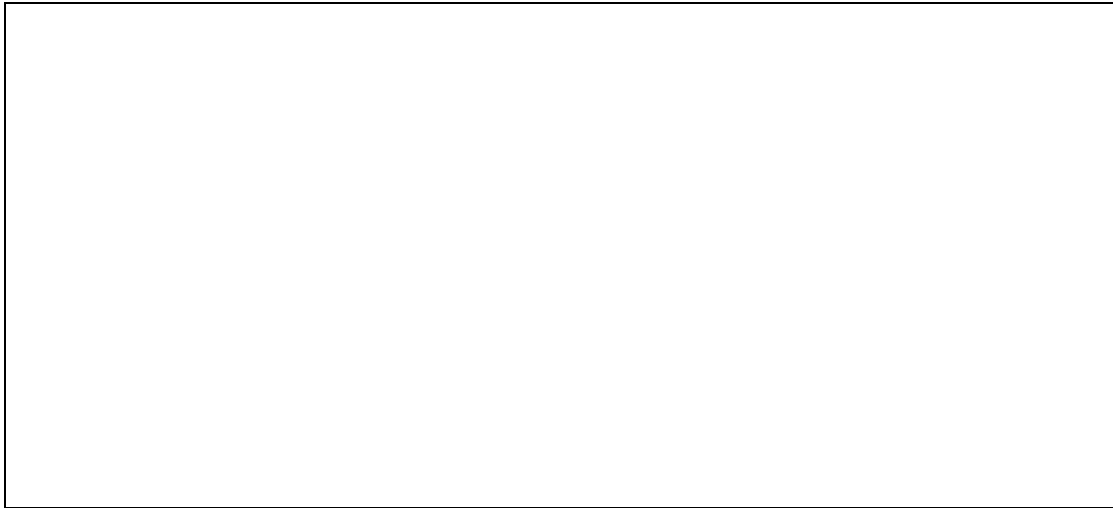
Lembar Jawaban:

3. Fluida mengalir melalui pipa berdiameter 8 cm dan debit aliran 0,7 l/detik. Tentukan apakah aliran adalah laminar atau turbulen apabila fluida tersebut adalah: air (angka kekentalan kinematik =  $1,3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{detik}$ ); Bensin ( $4,06 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{detik}$ ); gliserin ( $1,18 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{detik}$ ).

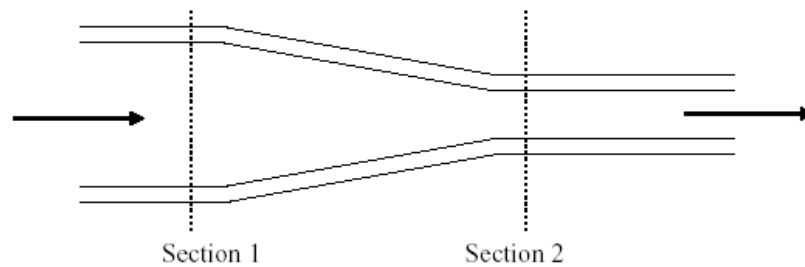
Lembar Jawaban:

4. Zat cair mengalir melalui pipa berdiameter 10 mm dan pada angka Reynold 1800. Kehilangan tenaga adalah 30 m tiap 100 m panjang pipa. Hitung debit aliran.

Lembar Jawaban:



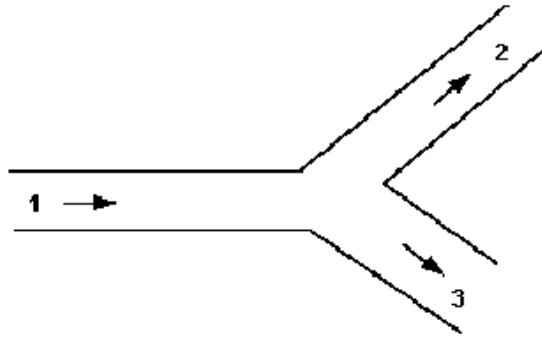
5. Jika Luas tampang 1 =  $0,01 \text{ m}^2$ , dan luas tampang 2 =  $0,003 \text{ m}^2$  serta kecepatan di tampang 1 =  $2,1 \text{ m/dt}$ , berapa kecepatan di tampang 2?



Lembar Jawaban:

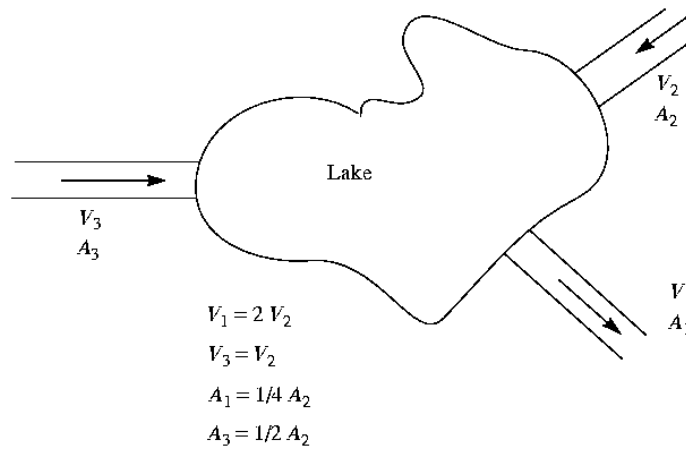


6. If pipe 1 diameter = 50 mm, mean velocity 2 m/s, pipe 2 diameter 40 mm takes 30 % of total discharge and pipe 3 diameter 60 mm. What are the values of discharge and mean velocity in each pipe?



Lembar Jawaban:

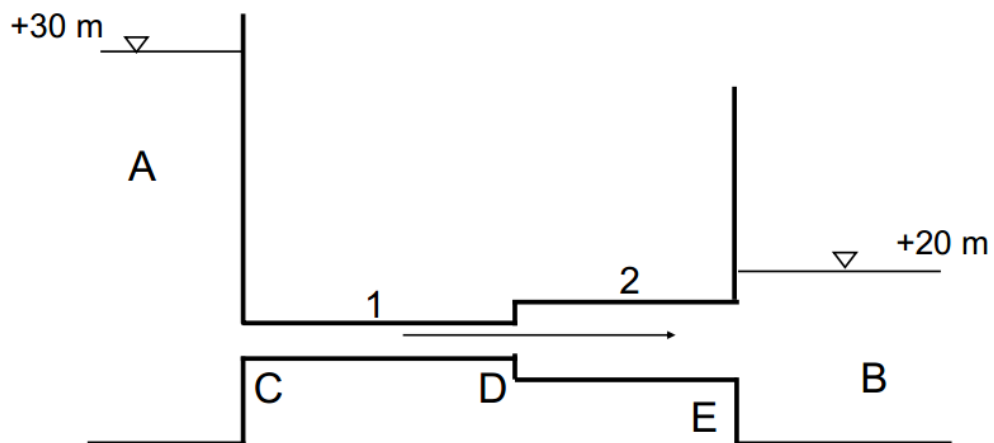
7. Suatu waduk dengan dua anak sungai dan satu outlet seperti tergambar, periksa apakah muka air waduk akan naik atau turun.





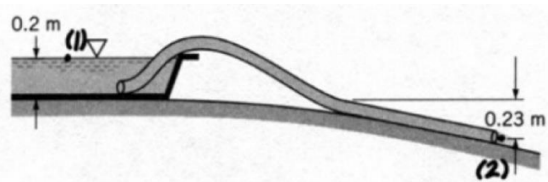
Lembar Jawaban:

8. Air mengalir dari Kolam A (elevasi +30 m) ke Kolam B (elevasi +20m) melalui Pipa 1 dan 2 seperti tergambar. Pipa 1 mempunyai panjang  $L_1 = 50$  m; diameter  $D_1 = 15$  cm; dan koefisien gesek  $f_1 = 0,02$ ; sedangkan Pipa 2  $L_2 = 40$ ,  $D_2 = 20$  cm, dan  $f_2 = 0,015$ . Koefisien kehilangan tinggi sekunder di C, D, dan E berturut-turut adalah 0,5; 0,5; dan 1. Hitunglah debit aliran.

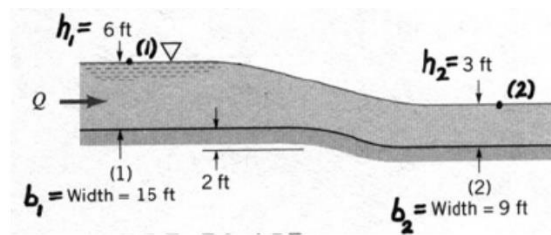


Lembar Jawaban:

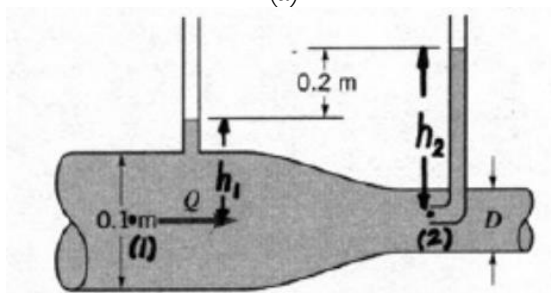
9. Tentukan debit aliran dari perilaku hidraulis berikut ini:



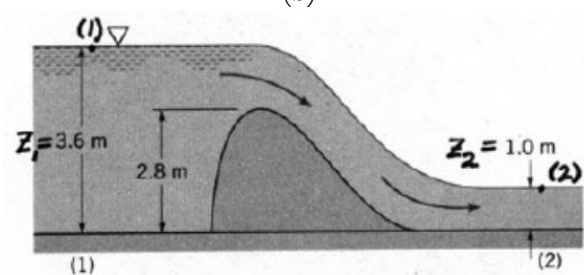
(a)



(b)



(c)



(d)

Lembar Jawaban:

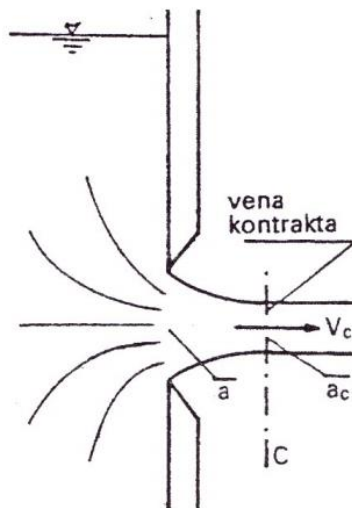
## BAB 4

### ALIRAN MELALUI LUBANG DAN PELUAP

#### A. Aliran melalui Lubang

Suatu lubang adalah bukaan pada dinding atau dasar tangki dimana zat cair akan mengalir melaluinya. Lubang tersebut dapat berbentuk segi empat, segitiga ataupun lingkaran. Biasanya lubang ini digunakan untuk mengukur debit aliran. Lubang lingkaran dengan sisi tajam adalah yang paling banyak digunakan untuk pengukuran debit aliran. Menurut ukurannya lubang dapat dibedakan menjadi lubang kecil dan besar.

Dipandang aliran melalui lubang seperti terlihat pada Gambar 4.1., bahwa pada aliran zat cair melalui lubang terjadi kehilangan tenaga akibat mengalami kontraksi, yang ditunjukkan oleh penguncupan aliran. Tampang aliran melalui lubang pada kontraksi (penyempitan) maksimum dikenal dengan vena kontrakta. Hal ini mengakibatkan beberapa parameter aliran akan lebih kecil dibanding pada zat cair ideal. Berkurangnya parameter aliran tersebut dapat ditunjukkan oleh beberapa koefisien, yaitu koefisien kontraksi ( $C_c$ ), koefisien kecepatan ( $C_v$ ), dan koefisien debit ( $C_d$ ). Nilai koefisien debit tergantung pada nilai  $C_c$  dan  $C_v$  yang nilai reratanya adalah sekitar 0,62.



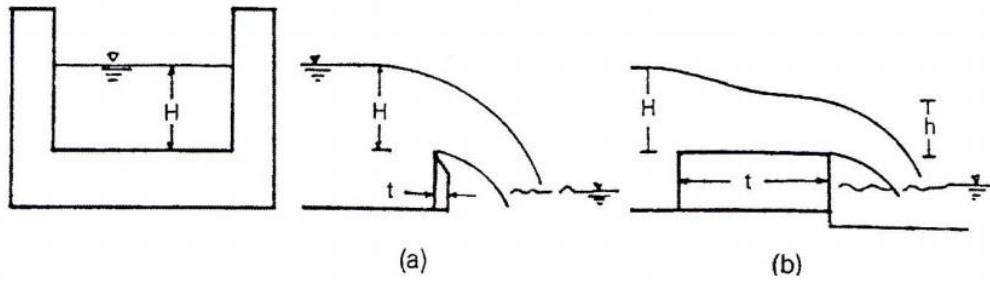
Gambar 4.1. Kontraksi aliran melalui lubang

Dalam menganalisis debit aliran yang melalui lubang dengan berbagai konfigurasi ukuran lubang, dapat dilihat pada Tabel 4.1.

#### B. Aliran melalui Peluap

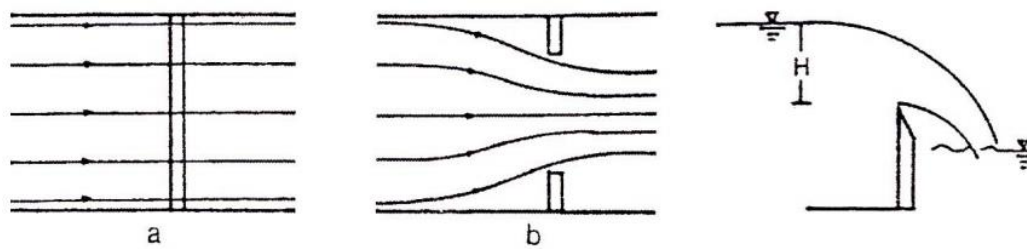
Peluap didefinisikan sebagai bukaan pada salah satu sisi kolam atau tangki sehingga zat cair dapat melimpas di atas peluap. Peluap ini serupa dengan lubang besar dimana elevasi permukaan zat cair di sebelah hulu lebih rendah dari sisi atas lubang.

Berdasarkan bentuk puncaknya peluap bisa berupa ambang tipis atau ambang lebar. Peluap ambang tipis apabila tebal peluap  $t < 0,5 H$ , dan disebut ambang lebar apabila  $t > 0,66 H$ .



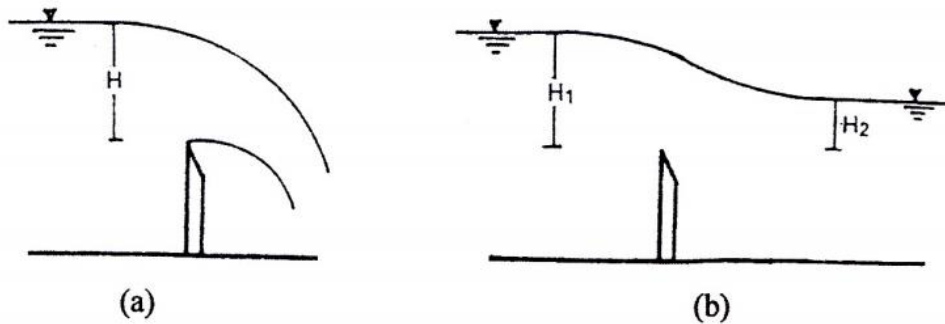
Gambar 4.2. Peluap ambang tipis (a) dan ambang lebar (b)

Apabila panjang peluap sama dengan lebar kolam/saluran disebut peluap tertekan, tetapi apabila panjang peluap tidak sama dengan lebar kolam/ saluran disebut peluap kontraksi samping.



Gambar 4.3. Peluap tertekan (a) dan kontraksi samping (b)

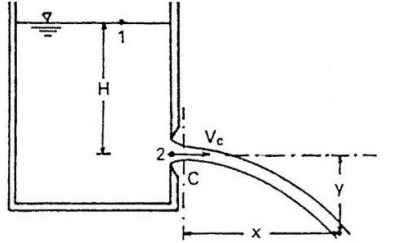
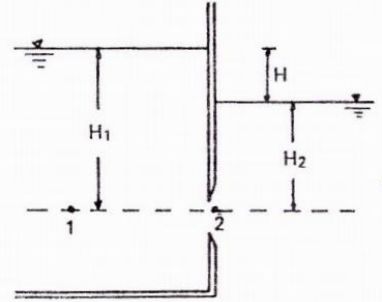
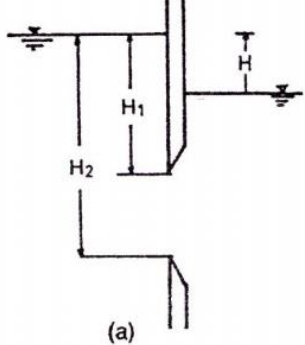
Menurut elevasi muka air di hilir, peluap bisa dibedakan menjadi peluap terjunan (sempurna) dan peluap terendam (tak sempurna). Peluap terjunan apabila muka air di hilir di bawah puncak peluap, sedangkan peluap terendam apabila muka air hilir di atas puncak peluap.

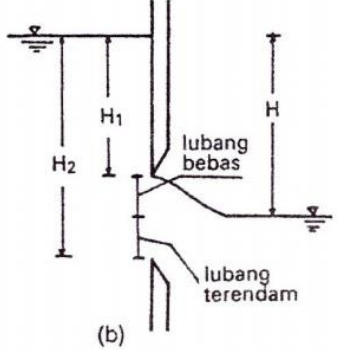
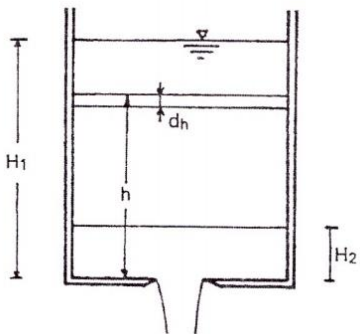
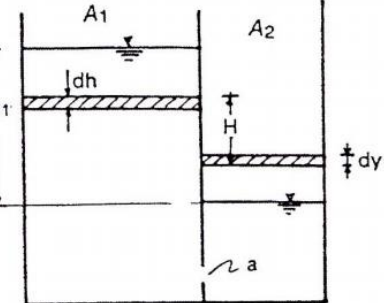


Gambar 4.4. Peluap terjunan (a) dan terendam (b)

Masing – masing bentuk dari peluap, memiliki persamaan debit aliran yang berbeda sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 1. Rumus hidraulik pada aliran melalui Lubang

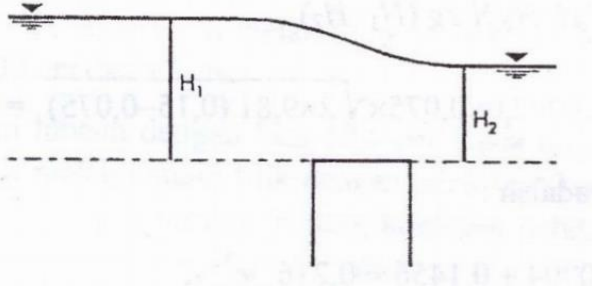
No.	Kondisi Lubang	Rumus - rumus yang digunakan	Gambar Ilustrasi
1	Lubang kecil	$Q = C_d a \sqrt{2gH}$	
2	Lubang Terendam	$Q = C_d a \sqrt{2gH}$	
3	Lubang besar (terendam keseluruhan)	$Q = C_d b (H_2 - H_1) \sqrt{2gH}$	 <p>(a)</p>

4	Lubang besar (terendam sebagian)	$Q = Q_{1(\text{bebas})} + Q_{2(\text{terendam})}$ $Q_1 = \frac{2}{3} C_d b \sqrt{2g} (H^{3/2} - H_1^{3/2})$ $Q_2 = C_d b (H_2 - H) \sqrt{2gH}$	
5	Waktu pengosongan tangki	$t = \frac{2A}{C_d a \sqrt{2g}} (H_1^{1/2} - H_2^{1/2})$	
6	Dari satu tangki ke tangki yang lain	$t = \frac{2A_1 A_2}{C_d a (A_1 + A_2) \sqrt{2g}} (H_1^{1/2} - H_2^{1/2})$	

Tabel 2. Rumus hidraulis pada aliran melalui Peluap

No.	Kondisi peluap	Rumus - rumus yang digunakan	Gambar Ilustrasi
1	Peluang ambang tipis (segiempat)	$Q = \frac{2}{3} C_d b \sqrt{2g} H^{3/2}$	
2	Peluang ambang tipis (segitiga)	$Q = \frac{8}{15} C_d t g \frac{\alpha}{2} \sqrt{2g} H^{5/2}$	
3	Peluang ambang tipis (trapesium)	$Q = \frac{2}{3} C_{d1} b \sqrt{2g} H^{3/2} + \frac{8}{15} C_{d2} \sqrt{2g} t g \frac{\alpha}{2} H^{5/2}$ <p style="text-align: center;"> <span style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px;">Bagian segiempat</span> <span style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px; margin-left: 100px;">Bagian segitiga</span> </p>	
4	Peluang ambang lebar	$Q_{maks} = 0,384 C_d b \sqrt{2g} H^{3/2}$ $Q_{maks} = 1,71 C_d b H^{3/2}$	



5	Peluang terendam	<p><b>Debit aliran pada peluapan sempurna:</b></p> $Q_1 = \frac{2}{3} C_d b \sqrt{2g} (H_1 - H_2)^{3/2}$ <p><b>Debit aliran pada bagian peluang terendam:</b></p> $Q_2 = C_d b H_2 \sqrt{2g(H_1 - H_2)}$	
---	------------------	--	---

### C. Latihan Soal

1. Air mengalir melalui lubang dengan diameter 8 cm, tinggi energi 12 m. Hitung debit nyata pada vena kontrakta apabila  $C_d = 0,62$  dan  $C_v = 0,95$ .

Lembar Jawaban:

2. Suatu lubang berbentuk lingkaran dengan diameter 3,0 cm, berada pada sisi tegak tangki. Tinggi muka air di atas pusat lubang adalah 1,00m. Lintasan pancaran air melalui suatu titik yang terletak pada jarak horizontal 35 cm dan vertikal ke bawah sebesar 3.5 cm dari pusat vena kontrakta. Debit aliran yang diperoleh dengan mengukur air yang tertampung dalam tangki adalah 1,35 l/detik. Tentukan koefisien kecepatan, koefisien debit, dan koefisien kontraksi lubang.

Lembar Jawaban:

3. Lubang besar berbentuk segiempat dengan lebar 0,8 m dan kedalaman 0,4 m mengalirkan air dari suatu tangki. Apabila elevasi muka air dalam tangki adalah 5,0 m di atas sisi atas lubang, hitunglah debit aliran. Koefisien debit  $C_d = 0,6$ .

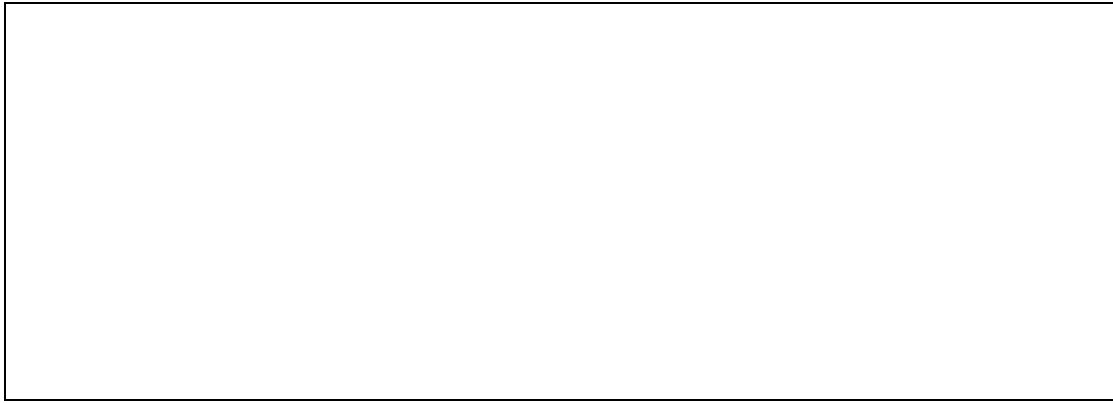
Lembar Jawaban:

- Lubang besar berbentuk segi empat dengan lebar 1,2 m dan tinggi 0,60 m. Elevasi muka air di sebelah hulu lubang adalah 3,5 m di atas sisi lubang. Aliran adalah terendam dengan elevasi muka air di sebelah hilir adalah 2,2 m di atas sisi atas lubang. Koefisien debit 0,62. Hitung debit aliran.

Lembar Jawaban:

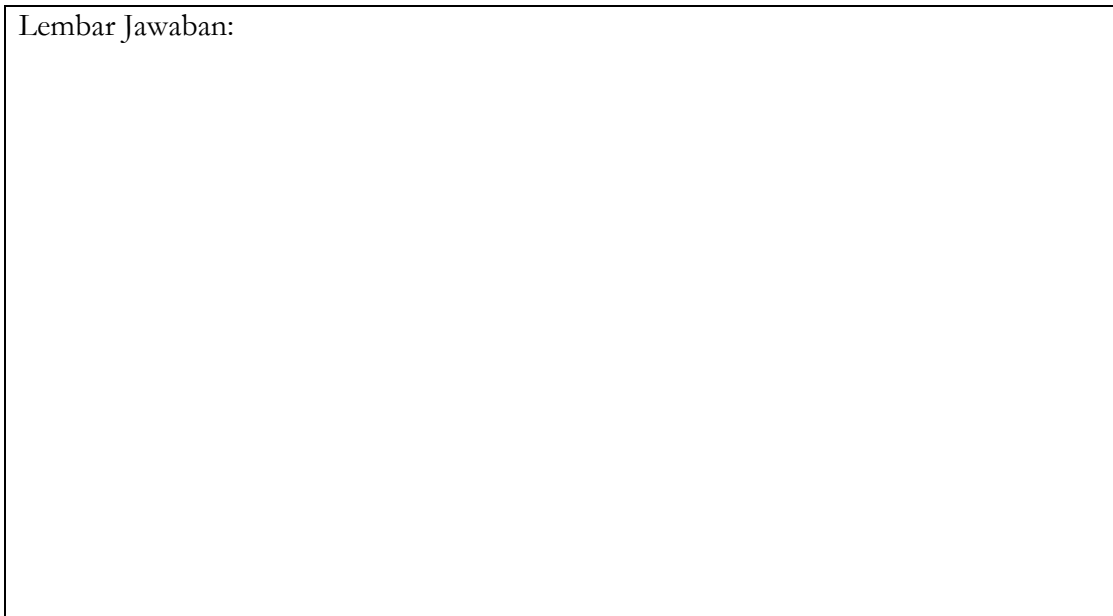
- Hitung debit aliran melalui lubang dengan lebar 2,0 m dan tinggi 2,0 m. Elevasi muka air pada sisi hulu adalah 3,25 m di atas sisi atas lubang dan elevasi muka air hilir adalah 1,0 m di atas sisi bawah lubang. Koefisien debit adalah  $C_d = 0,62$ .

Lembar Jawaban:



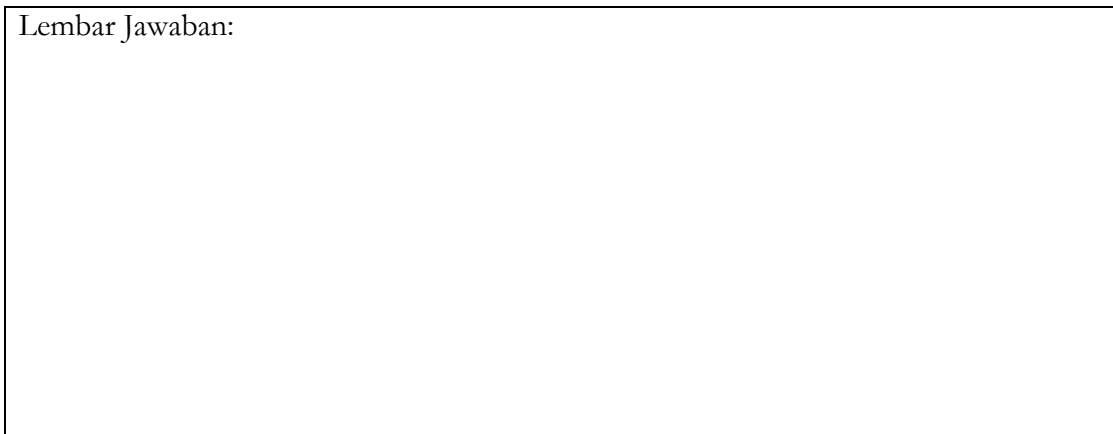
6. Kolam renang dengan panjang 25 m dan lebar 15 m mempunyai kedalaman air 1,8 m. Pengosongan kolam dilakukan dengan membuat lubang seluas  $0,30 \text{ m}^2$  yang terletak di dasar kolam. Koefisien debit = 0,62. Hitung waktu yang diperlukan untuk mengosongkan kolam.

Lembar Jawaban:



7. Tangki dengan luas tampang  $6 \text{ m}^2$  mempunyai lubang berbentuk lingkaran dengan diameter  $d = 12 \text{ cm}$ . Sebelum terjadi pengaliran melalui lubang, elevasi muka air adalah 12 m di atas lubang. Hitunglah elevasi muka air setelah pengaliran selama 7 menit.

Lembar Jawaban:



8. Peluap segiempat dengan lebar 3,5 m mempunyai tinggi peluapan 0,35 m. Hitung debit peluapan apabila koefisien debit  $C_d = 0,62$ .

Lembar Jawaban:

9. Peluap segitiga dengan sudut  $\alpha = 90^\circ$  digunakan untuk mengukur debit aliran. Apabila tinggi peluapan  $H = 18$  cm dan  $C_d = 0,62$ , hitunglah debit aliran.

Lembar Jawaban:

10. Selama percobaan di laboratorium, 40 liter air mengalir melalui peluap segitiga siku-siku selama satu menit. Apabila tinggi adalah 6 cm, hitung koefisien debit peluap.

Lembar Jawaban:

11. Bendung ambang lebar dengan panjang 8 m mengalirkan air dengan debit maksimum  $10 \text{ m}^3/\text{detik}$ . Tentukan tinggi peluapan pada sisi hulu bendung apabila koefisien debit  $C_d = 0,62$ .

Lembar Jawaban:

12. Tentukan debit maksimum melalui peluap ambang lebar sepanjang 55 m, dengan tinggi peluapan sebesar 50 cm di atas ambang. Koefisien debit adalah 0,6. Tentukan pula debit aliran dengan memperhitungkan kecepatan awal apabila luas tampang saluran di sebelah hulu peluap adalah  $40 \text{ m}^2$

Lembar Jawaban:

13. Peluap terendam dengan panjang 2,5 m mempunyai tinggi air di sebelah hulu dan hilir peluap sebesar 18 cm dan 9 cm di atas mercu peluap. Hitung debit aliran melalui peluap jika koefisien debit untuk bagian yang bebas dan terendam adalah 0,60 dan 0,79.

Lembar Jawaban:

14. Peluap ambang tipis dengan tinggi 0,6 m berada pada saluran segi empat dengan lebar 3,5 m. Kedalaman air di saluran adalah 1,2 m. Tentukan debit aliran.

Lembar Jawaban:

## BAB 5

### ALIRAN MELALUI PIPA

Pipa adalah saluran tertutup yang biasanya berpenampang lingkaran, untuk mengalirkan zat cair dengan tampang aliran penuh. Apabila zat cair dalam pipa tidak penuh, maka aliran termasuk dalam aliran saluran terbuka, karena memiliki permukaan bebas yang dipengaruhi oleh tekanan atmosfer.

#### A. Kehilangan Tenaga Aliran Melalui Pipa

Untuk zat cair riil yang memiliki viskositas tertentu, terjadi adanya kehilangan tenaga di sepanjang pipa baik primer maupun sekunder. Kehilangan primer akibat adanya gesekan terhadap dinding pipa oleh tegangan geser. Kehilangan tenaga sekunder karena aliran mengalami gangguan (misalnya: akibat percabangan pipa, belokan pipa, sambungan dan sebagainya)

##### 1. Kehilangan Tenaga Primer (Akibat Gesekan)

Dalam menentukan kehilangan tenaga akibat gesekan digunakan persamaan Darcy – Weisbach untuk aliran melalui pipa lingkaran, sebagaimana berikut:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2.g} \dots\dots\dots(44)$$

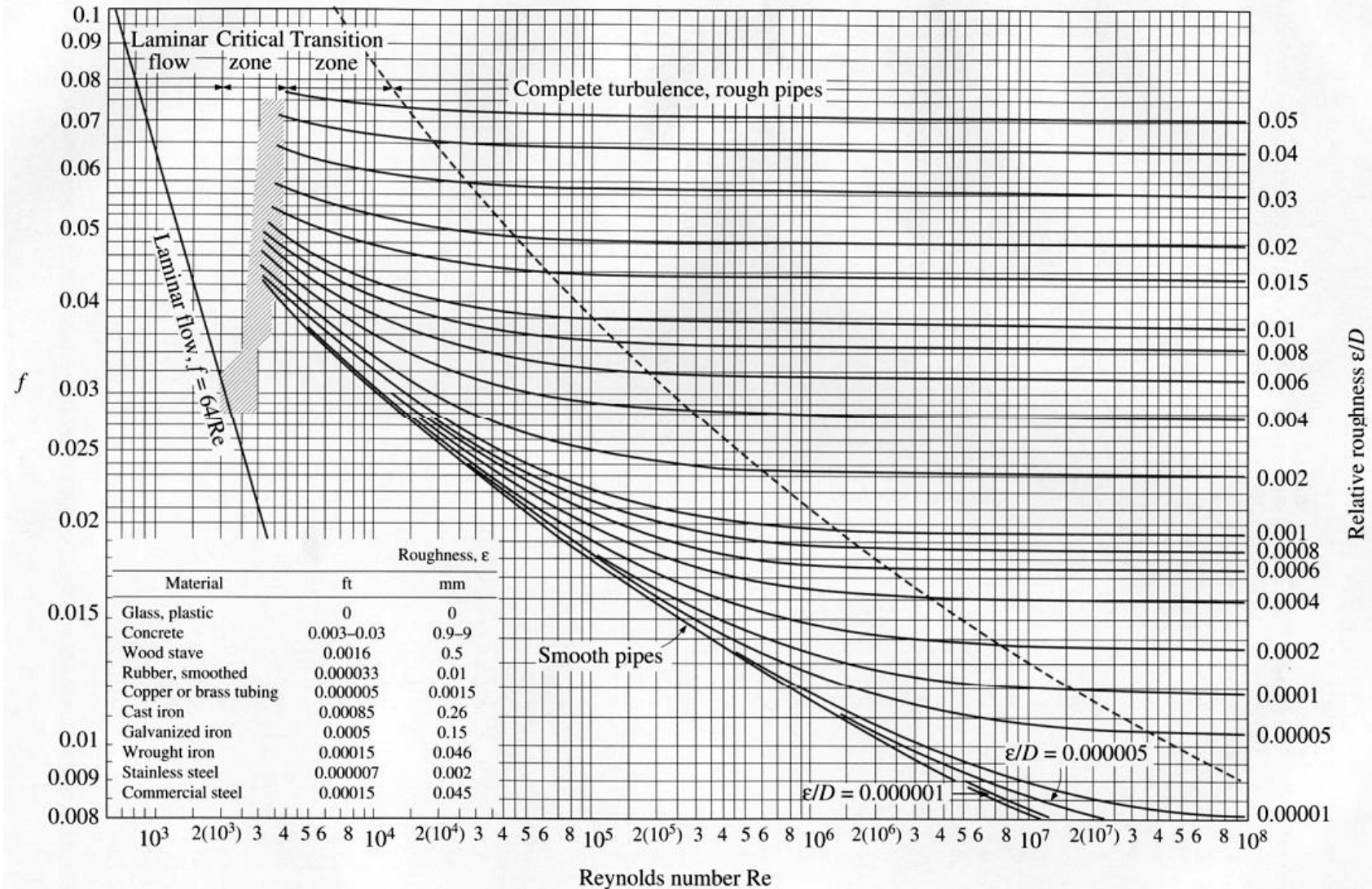
dimana V adalah kecepatan aliran (m/s), f adalah koefisien gesekan, L adalah panjang pipa (m), g adalah percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>) dan D adalah diameter pipa (m).

Koefisien f merupakan fungsi dari angka Reynolds dan kekasaran pipa, yang ditentukan menggunakan Grafik Moody yang ditunjukkan pada Gambar 5.1. Grafik tersebut memiliki empat daerah yaitu daerah pengaliran laminer, daerah kritis dimana nilainya tidak tetap karena pengaliran mungkin laminer atau turbulen, daerah transisi dimana f merupakan fungsi dari angka Reynolds dan kekasaran dinding pipa, dan daerah turbulen sempurna dimana nilai f tidak tergantung pada angka Reynolds, tetapi hanya pada kekasaran relatif. Untuk menggunakan grafik tersebut, nilai kekasaran dinding pipa (k) diperoleh dari Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Tinggi kekasaran pipa

<b>Jenis pipa</b>	<b>Nilai k (mm)</b>
<b>Kaca</b>	<b>0,0015</b>
<b>Besi dilapis aspal</b>	<b>0,06 – 0,24</b>
<b>Besi tuang</b>	<b>0,18 – 0,90</b>
<b>Plester semen</b>	<b>0,27 – 1,20</b>
<b>Beton</b>	<b>0,30 – 3,00</b>
<b>Baja</b>	<b>0,03 – 0,09</b>
<b>Baja dikeling</b>	<b>0,90 – 9,00</b>
<b>Pasangan batu</b>	<b>6</b>





Gambar 5.1. Grafik Moody

## 2. Pengaruh Pertambahan Umur Pipa

Semakin bertambah umur pipa semakin berkurang kemampuannya untuk melewati debit karena adanya kerak atau kotoran pada permukaan dalam pipa, sehingga memperbesar koefisien gesekan. Menurut Colebrook dan White kekasaran pipa bertambah secara linier dengan umurnya dan ditunjukkan dengan rumus berikut:

$$k_t = k_0 + \alpha t \quad \dots\dots\dots(45)$$

dimana  $k_t$  adalah kekasaran pipa setelah  $t$  tahun,  $k_0$  adalah kekasaran pipa baru,  $\alpha$  adalah pertambahan kekasaran pipa  $t =$  tahun. Nilai  $\alpha$  dapat diperoleh dari percobaan yang dilakukan untuk interval waktu tertentu.

## 3. Kehilangan Tenaga Sekunder dalam Pipa

Disamping adanya kehilangan tenaga akibat gesekan (kehilangan tenaga primer), terjadi pula kehilangan tenaga yang disebabkan oleh perubahan penampang pipa, sambungan, belokan, dan katup (kehilangan tenaga sekunder). Apabila kehilangan tenaga sekunder kurang dari 5% dari kehilangan tenaga primer seringkali bisa diabaikan. Berikut cara menentukan kehilangan tenaga sekunder disesuaikan dengan penyebabnya:

### a. Perbesar penampang

Kehilangan tenaga yang terjadi pada saat perbesaran penampang mendadak dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$h_e = K \frac{V_1^2}{2g} \quad \dots\dots\dots(46)$$

dengan

$$K = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \quad \dots\dots\dots(47)$$

Apabila pipa masuk ke dalam kolam yang besar seperti Gambar 5.2.b, maka:

$$h_e = \frac{V_1^2}{2g} \quad \dots\dots\dots(48)$$

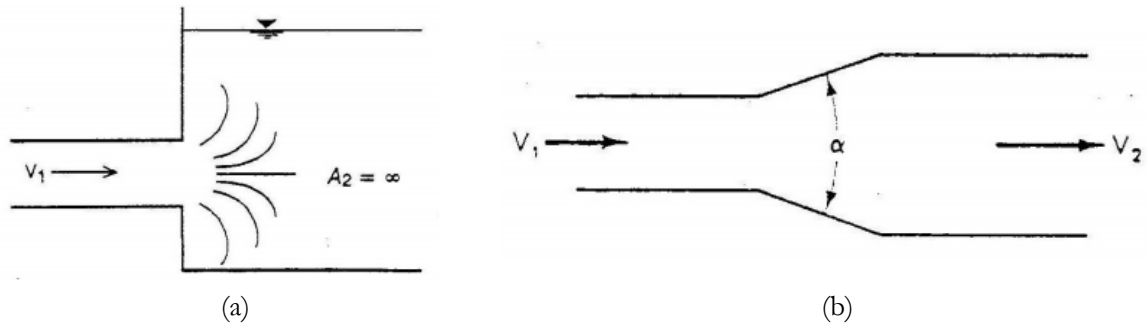
Apabila pipa dibuat secara berangsur-angsur seperti Gambar 5.2.b, maka:

$$h_e = K' \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} \quad \dots\dots\dots(49)$$

dengan nilai  $K'$  diberikan pada Tabel 5.2.

Tabel 5.2. Nilai  $K'$  sebagai fungsi dari  $\alpha$

$\alpha$	10°	20°	30°	40°	50°	60°	75°
$K'$	0,078	0,31	0,49	0,60	0,67	0,72	0,72



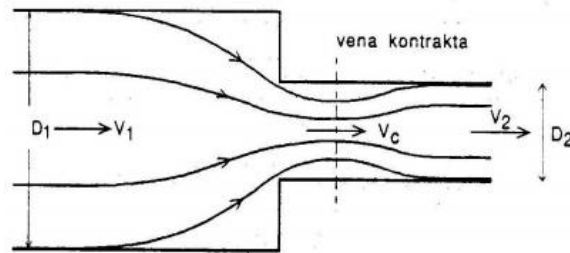
Gambar 5.2. Pipa menuju kolam (a) dan perbesaran penampang berangsur-angsur (b)

b. Pengecilan penampang

Kehilangan tenaga yang terjadi pada saat pengecilan penampang mendadak seperti pada Gambar 5.3., dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

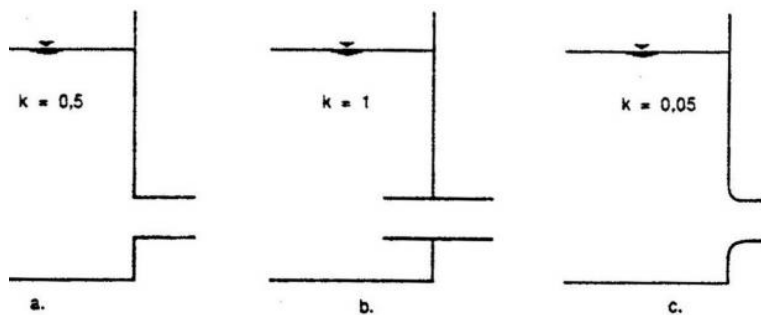
$$h_e = 0,44 \frac{V_2^2}{2g} \dots\dots\dots(50)$$

Dalam prakteknya nilai K diambil 0,5.



Gambar 5.3. Pengecilan pipa

Pada lubang masuk dari kolam ke pipa, kehilangan tenaga tergantung pada bentuk lubang pemasukan. Pada Gambar 5.4, ditunjukkan bentuk lubang pemasukan dan nilai K.

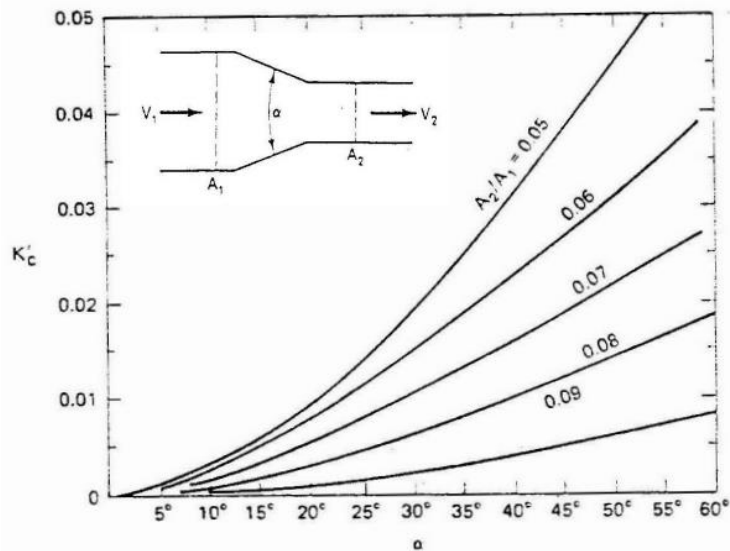


Gambar 5.4. Macam lubang pemasukan dari kolam

Apabila pipa pengecilan dibuat penampang secara berangsur-angsur, maka:

$$h_e = K'_c \frac{V_2^2}{2g} \dots\dots\dots(51)$$

dengan nilai  $K'_c$  tergantung pada sudut transisi  $\alpha$  dan perbandingan luas tampang  $A_2/A_1$  seperti ditunjukkan pada Gambar 5.5.



Gambar 5.5. Koefisien  $K'_c$  sebagai fungsi  $\alpha$

c. Belokan pipa

Kehilangan tenaga yang terjadi pada belokan tergantung pada sudut belokan pipa. Rumus yang digunakan serupa dengan rumus pada perubahan penampang, yaitu:

$$h_b = K_b \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots(52)$$

Dengan nilai  $K_b$  adalah koefisien kehilangan tenaga pada belokan yang diberikan pada Tabel 5.3.

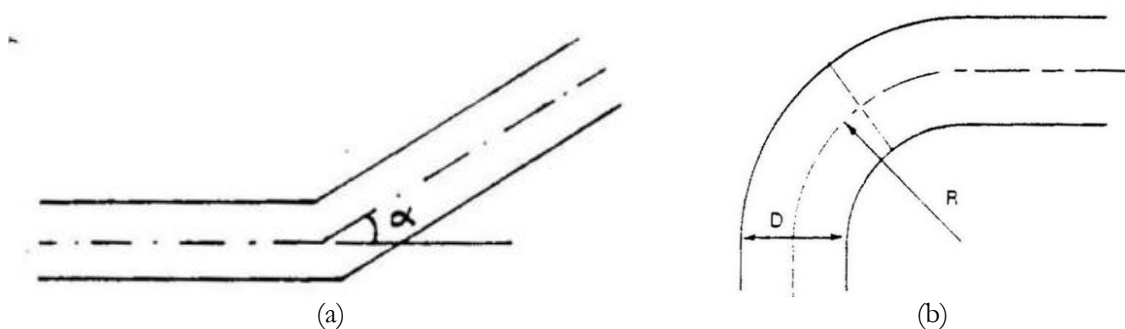
Tabel 5.3. Koefisien  $K_b$  sebagai fungsi sudut belokan  $\alpha$

$\alpha$	20°	40°	60°	80°	90°
$K_b$	0,05	0,14	0,36	0,74	0,98

Untuk sudut belokan 90° dan dengan belokan halus (berangsur-angsur), kehilangan tenaga bergantung pada perbandingan antara jari-jari belokan dengan diameter pipa. Nilai  $K_b$  untuk berbagai nilai  $R/D$  disajikan pada Tabel 5.4.

Tabel 5.4. Nilai  $K_b$  sebagai fungsi  $R/D$

$R/D$	1	2	4	6	10	16	20
$K_b$	0,35	0,19	0,17	0,22	0,32	0,38	0,42



Gambar 5.6. Belokan pipa

## B. Rumus Empirik Aliran melalui Pipa

Dalam hitungan praktis, faktor penting dalam studi hidraulika seperti kecepatan aliran di dalam pipa, dapat ditentukan melalui rumus-rumus empiris, sebagaimana disajikan pada Tabel 5.5.

Tabel 5.5. Beberapa rumus empirik pada aliran dalam pipa

No.	Jenis Pipa	Rumus - Rumus	Keterangan
1	Pipa halus	$V = 76D^{0,4}I^{0,54}$	V : kecepatan aliran (m/s) D : diameter pipa (m) I : kemiringan garis energi
2	Pipa di daerah transisi	$V = 0,354C_{HI}^{0,54}D^{0,63}$	V : kecepatan aliran (m/s) D : diameter pipa (m) CH : koefisien Hazen—William (Tabel xx.) I : kemiringan garis energi
3	Pipa di daerah turbulen	$V = \frac{1}{n}R^{\frac{2}{3}}I^{\frac{1}{2}}$ $R = \frac{A}{P}$ Untuk pipa lingkaran maka: $V = \frac{0,397}{n}D^{\frac{2}{3}}I^{\frac{1}{2}}$	V : kecepatan aliran (m/s) D : diameter pipa (m) I : kemiringan garis energi R : jari – jari hidraulik (m) A : luas tampang basah (m <sup>2</sup> ) P : keliling tampang basah (m) n : koefisien manning (Tabel xx)

Tabel 5.6. Koefisien Hazen William

Nilai CH	Jenis Pipa
140	Pipa sangat halus
130	Pipa halus, semen, besi tuang baru
120	Pipa baja dilas baru
110	Pipa baja dikeling baru
100	Pipa besi tuang tua
95	Pipa baja dikeling tua
60 – 80	Pipa tua

Tabel 5.7. Koefisien Manning n untuk aliran melalui pipa

Tipe pipa	Koefisien Manning (n)
Kaca, kuningan atau tembaga	0,009 – 0,013
Permukaan semen halus	0,010 – 0,013
Kayu	0,010 – 0,013
Besi tuang	0,011 – 0,015
Beton precast	0,011 – 0,015
Permukaan mortar semen	0,011 – 0,015
Pipa tanah dibakar	0,011 – 0,017
Besi	0,012 – 0,017
Batu dengan mortar semen	0,012 – 0,017
Baja dikeling	0,017 – 0,020
Permukaan batu dengan semen	0,020 – 0,024

Dalam menentukan kemiringan garis energi (I/Sf), dapat menggunakan pendekatan beberapa rumus empiris berikut: **(Mohon diperhatikan satuan yang digunakan)**

Tabel 5.8. Beberapa rumus empiris untuk menentukan kemiringan garis energi

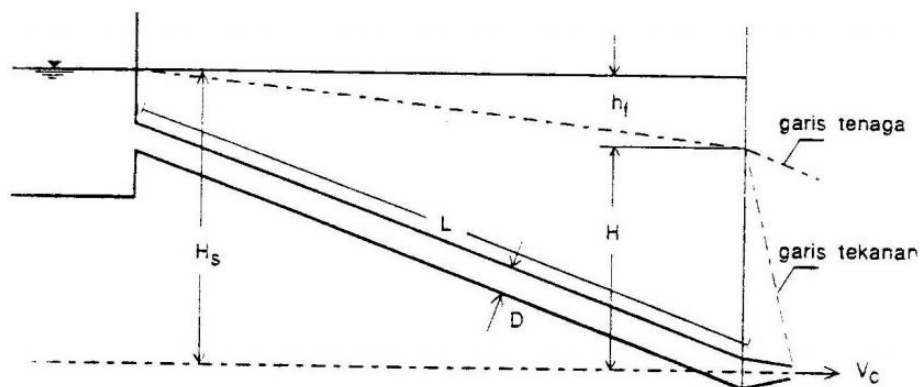
Equation	Q (m <sup>3</sup> /s); D (m)	Q (cfs); D (ft)	Q (gpm); D (in.)
Darcy-Weisbach	$S_f = \frac{0.083fQ^2}{D^5}$	$S_f = \frac{0.025fQ^2}{D^5}$	$S_f = \frac{0.031fQ^2}{D^5}$
Hazen-Williams	$S_f = \frac{10.7}{D^{4.87}} \left(\frac{Q}{C}\right)^{1.852}$	$S_f = \frac{4.73}{D^{4.87}} \left(\frac{Q}{C}\right)^{1.852}$	$S_f = \frac{10.5}{D^{4.87}} \left(\frac{Q}{C}\right)^{1.852}$
Manning	$S_f = \frac{10.3(nQ)^2}{D^{5.33}}$	$S_f = \frac{4.66(nQ)^2}{D^{5.33}}$	$S_f = \frac{13.2(nQ)^2}{D^{5.33}}$

### C. Sistem Perpipaan

Sistem pemipaan berfungsi untuk mengalirkan zat cair dari satu tempat ke tempat yang lain. Aliran terjadi karena adanya perbedaan tinggi tekanan di kedua tempat, yang bisa terjadi karena adanya perbedaan elevasi muka air atau karena digunakannya pompa. Dalam sub bab ini, akan dipelajari beberapa sistem pemipaan seperti: pipa dengan turbin dan pompa, pipa dalam hubungan seri dan paralel, pipa bercabang, dan sistem jaringan pipa.

#### 1. Pipa dengan curat (turbin)

Di dalam pembangkit tenaga listrik, tenaga air digunakan untuk memutar turbin. Untuk mendapatkan kecepatan yang besar guna memutar turbin, pada ujung pipa diberi curat, seperti terlihat pada Gambar 5.7.



Gambar 5.7. Pipa dengan curat

Dengan menganggap kehilangan tenaga sekunder diabaikan, tinggi tekanan efektif  $H$  adalah sama dengan tinggi statis  $H_s$  dikurangi kehilangan tenaga akibat gesekan  $h_f$ . Dengan demikian tinggi tekanan efektif dapat ditulis sebagai:

$$H = H_s - \frac{8fLQ^2}{g\pi^2 D^5} \dots\dots\dots(53)$$

Daya yang tersedia pada curat:

$$D = QH\gamma \text{ (kgf m / d)} \dots\dots\dots(54)$$

Apabila dikehendaki satuan dalam hp (horse power, daya kuda) maka:

$$D = \frac{QH\gamma}{75} \text{ (hp)} \dots\dots\dots(55)$$

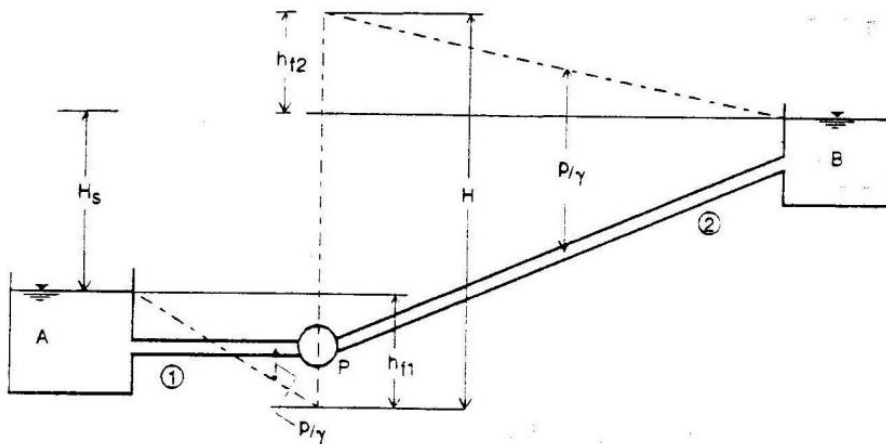
Apabila efisiensi turbin adalah  $\eta$ , maka daya yang diberikan oleh turbin adalah:

$$D = \frac{QH\gamma\eta}{75} \text{ (hp)} \dots\dots\dots(56)$$

Dimana Q adalah debit aliran ( $m^3/d$ ), H adalah tinggi tekanan efektif (m), dan berat jenis zat cair ( $kgf/m^3$ ).

### 2. Pipa dengan pompa

Jika pompa menaikkan zat cair dari kolam satu ke kolam lain dengan selisih mukai air  $H_s$ , seperti pada Gambar 5.8. Maka daya yang digunakan oleh pompa adalah sama dengan tinggi  $H_s$  ditambah dengan kehilangan tenaga selama pengaliran. Kehilangan terjadi pada pengaliran di pipa 1 dan pipa 2 sebesar  $h_{f1}$  dan  $h_{f2}$ .



Gambar 5.8. Pipa dengan pompa

Daya yang digunakan pompa untuk menaikkan zat cair:

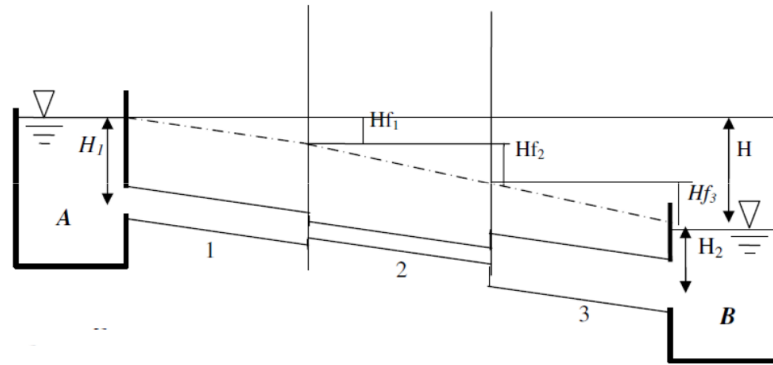
$$D = \frac{QH\gamma}{\eta} \text{ (kgf m / d)} \dots\dots\dots(57)$$

$$D = \frac{QH\gamma}{75\eta} \text{ (hp)} \dots\dots\dots(58)$$

Dengan  $\eta$  adalah efisiensi pompa. Digunakan sebagai pembagi dalam rumus daya pompa.

### 3. Pipa hubungan seri

Apabila suatu saluran pipa terdiri dari pipa-pipa dengan ukuran yang berbeda, pipa tersebut adalah dalam hubungan seri, seperti yang terlihat pada Gambar 5.9.



Gambar 5.9. Pipa dalam hubungan seri

Kehilangan tenaga pada masing-masing pipa adalah  $hf_1$ ,  $hf_2$ , dan  $hf_3$ . Dianggap bahwa kehilangan tenaga sekunder kecil sehingga diabaikan. Persamaan kontinuitas:

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 \quad \dots\dots\dots(59)$$

$$H = h_{f_1} + h_{f_2} + h_{f_3} \quad \dots\dots\dots(60)$$

Dengan menggunakan persamaan Darcy – Weisbach, maka didapatkan:

$$H = \frac{8Q^2}{g\pi^2} \left( \frac{f_1 L_1}{D_1^5} + \frac{f_2 L_2}{D_2^5} + \frac{f_3 L_3}{D_3^5} \right) \quad \dots\dots\dots(61)$$

$$Q = \frac{\pi\sqrt{2gH}}{4 \left( \frac{f_1 L_1}{D_1^5} + \frac{f_2 L_2}{D_2^5} + \frac{f_3 L_3}{D_3^5} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad \dots\dots\dots(62)$$

Kadang – kadang penyelesaian pipa seri dilakukan dengan suatu pipa ekuivalen yang mempunyai penampang seragam, biasanya diambil diameter  $D_e$  dan koefisien gesekan  $f_e$  dari pipa yang terpanjang (atau yang telah ditentukan), kemudian dapat ditentukan panjang pipa ekuivalen dengan rumus - rumus berikut:

$$H = \frac{8Q^2}{g\pi^2} \left( \frac{f_e L_e}{D_e^5} \right) \quad \dots\dots\dots(63)$$

$$L_e = \frac{D_e^5}{f_e} \left( \frac{f_1 L_1}{D_1^5} + \frac{f_2 L_2}{D_2^5} + \frac{f_3 L_3}{D_3^5} \right) \quad \dots\dots\dots(64)$$

#### 4. Pipa hubungan paralel

Apabila pada keadaan di mana aliran melalui dua atau lebih pipa dihubungkan secara paralel, seperti yang terlihat pada Gambar 5.10. Maka persamaan kontinuitasnya adalah:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad \dots\dots\dots(65)$$

$$H = h_{f_1} = h_{f_2} = h_{f_3} \quad \dots\dots\dots(66)$$

Dengan menggunakan persamaan Darcy – Weisbach, maka didapatkan:

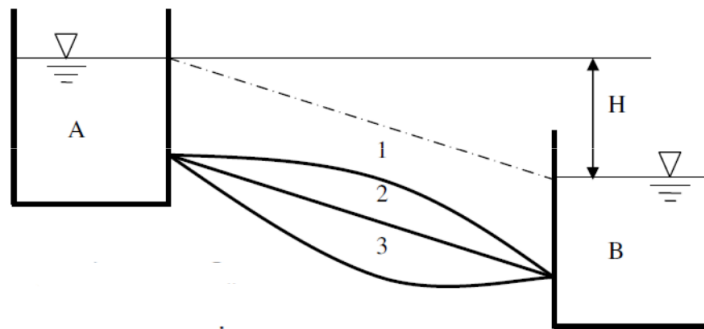


$$H = f_1 \frac{L_1}{D_1} \frac{V_1^2}{2g} = f_2 \frac{L_2}{D_2} \frac{V_2^2}{2g} = f_3 \frac{L_3}{D_3} \frac{V_3^2}{2g} \dots\dots\dots(67)$$

$$Q = \frac{\pi}{4} \sqrt{2g} \left( \frac{D_e^5}{f_e L_e} \right)^{\frac{1}{2}} H^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(68)$$

Dengan melakukan substitusi persamaan maka didapatkan:

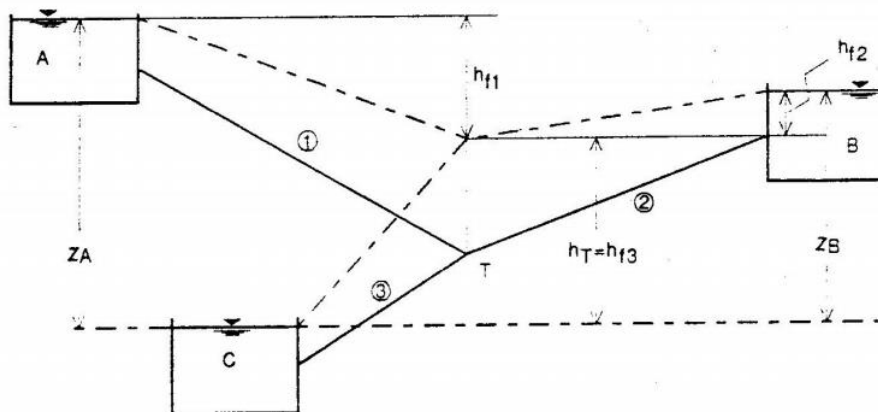
$$\left( \frac{D_e^5}{f_e L_e} \right)^{\frac{1}{2}} = \left( \frac{D_1^5}{f_1 L_1} \right)^{\frac{1}{2}} + \left( \frac{D_2^5}{f_2 L_2} \right)^{\frac{1}{2}} + \left( \frac{D_3^5}{f_3 L_3} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(69)$$



Gambar 5.10. Pipa dalam hubungan paralel

5. Pipa bercabang

Sering suatu sistem pipa menghubungkan tiga atau lebih kolam, seperti yang terlihat pada Gambar 5.11. dimana suatu sistem pipa bercabang dari tiga kolam.



Gambar 5.11. Pipa menghubungkan tiga kolam

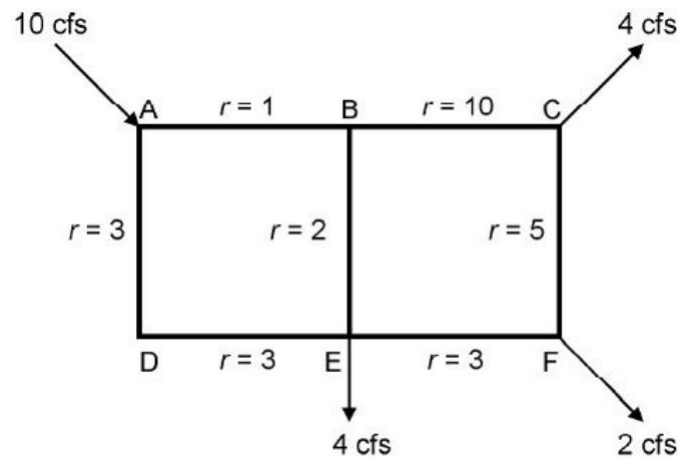
Persamaan kontinuitas pada titik cabang, yaitu aliran menuju titik cabang T harus sama dengan yang meninggalkan T, sehingga: Apabila garis tekanan di T lebih tinggi dari elevasi muka air kolam B maka berlaku persamaan kontinuitas  $Q_1 = Q_2 + Q_3$ , dan apabila sebaliknya maka berlaku persamaan kontinuitas  $Q_1 + Q_2 = Q_3$ . Prosedur hitungan adalah sebagai berikut:

- a. Anggap garis tekanan di titik T mempunyai elevasi  $h_T$
- b. Hitung  $Q_1$ ,  $Q_2$ , dan  $Q_3$  untuk keadaan tersebut.

- c. Jika persamaan kontinuitas dipenuhi, maka nilai  $Q_1$ ,  $Q_2$ , dan  $Q_3$  adalah benar.
- d. Jika aliran menuju T tidak sama dengan aliran yang meninggalkan T, dibuat anggapan baru elevasi garis tekanan di T, yaitu dengan menaikkan garis tekanan di T apabila aliran masuk lebih besar daripada aliran keluar dan menurunkannya apabila aliran masuk lebih kecil dari aliran keluar.
- e. Ulangi prosedur tersebut sampai dipenuhinya persamaan kontinuitas.

## 6. Jaringan Pipa

Sebuah sistem distribusi air terdiri dari pipa yang saling berhubungan yang kompleks, reservoir dan/atau pompa, yang mengantarkan air dari instalasi pengolahan kepada konsumen. Kebutuhan air sangat bervariasi, sedangkan pasokan biasanya konstan. Dengan demikian, sistem distribusi harus mencakup unsur-unsur penyimpanan, dan harus mampu beroperasi secara fleksibel. Analisis jaringan Pipa meliputi penentuan debit aliran dan tinggi tekanan pada titik pengambilan dari jaringan. Debit aliran dan tinggi tekanan harus memenuhi persamaan kontinuitas dan energi. Gambar 5.12 adalah contoh suatu sistem jaringan pipa.



Gambar 5.12. Contoh suatu sistem jaringan pipa

Metode analisis jaringan yang sering dipakai adalah Metode Hardy Cross. Metode ini berlaku untuk sistem di mana pipa membentuk loop tertutup. Untuk sistem jaringan pipa tertentu dengan jumlah aliran masuk/ keluar yang diketahui, metode Hardy Cross melakukan prosedur iterasi didasarkan pada kondisi awal aliran dalam pipa. Pada jaringan pipa harus dipenuhi persamaan kontinuitas dan tenaga, yaitu:

- a. Aliran di dalam pipa harus memenuhi hukum-hukum gesekan pipa untuk aliran dalam pipa tunggal.
- b. Aliran masuk ke dalam tiap titik simpul harus sama dengan aliran yang keluar.
- c. Jumlah aljabar dari kehilangan tenaga dalam satu jaringan tertutup harus sama dengan nol.

Prosedur perhitungan dengan metode Hardy Cross adalah sebagai berikut:

- a. Pilih pembagian debit melalui tiap-tiap pipa  $Q_0$  hingga terpenuhi syarat kontinuitas
- b. Hitung kehilangan tenaga pada tiap pipa dengan rumus  $hf = kQ^2$ .
- c. Jaringan pipa dibagi menjadi sejumlah jaringan tertutup sedemikian sehingga tiap pipa termasuk dalam paling sedikit satu jaring.

- d. Hitung jumlah kerugian tinggi tenaga sekeliling tiap-tiap jaring, yaitu  $\sum h_f$ . Jika pengaliran seimbang maka  $\sum h_f = 0$ .
- e. Hitung nilai  $\sum |2kQ|$  untuk tiap jaring.
- f. Pada tiap jaring diadakan koreksi debit  $\Delta Q$ , supaya kehilangan tinggi tekanan dalam jaring seimbang. Adapun koreksinya adalah sebagai berikut:
 
$$\Delta Q = \frac{\sum kQ_o^2}{\sum |2kQ_o|}$$
- g. Dengan debit yang telah dikoreksi sebesar  $Q = Q_o + \Delta Q$ , prosedur dari a sampai f diulangi hingga akhirnya  $\Delta Q = 0$ , dengan  $Q$  adalah debit sebenarnya,  $Q_o$  adalah debit dimisalkan dan  $\Delta Q$  adalah debit koreksi.

Hitungan jaringan pipa sederhana dilakukan dengan membuat tabel untuk setiap jaring. Dalam setiap jaring tersebut jumlah aljabar kehilangan tenaga adalah nol, dengan catatan aliran searah jarum jam (ditinjau dari pusat jaringan) diberi tanda positif, sedang yang berlawanan bertanda negatif.

#### D. Latihan Soal

1. Air mengalir melalui pipa sepanjang 1000 m dan diameternya 120 mm dengan debit 45 l/detik. Hitung kehilangan tenaga karena gesekan apabila koefisien gesekan  $f = 0,02$ .

Lembar Jawaban:

2. Air mengalir dari kolam A menuju kolam B melalui pipa sepanjang 150 m dan diameter 15 cm. Perbedaan elevasi muka air kedua kolam adalah 3 m. Koefisien gesekan Darcy-Weisback  $f = 0,025$ . Hitung debit aliran, kehilangan tenaga sekunder diperhitungkan.

Lembar Jawaban:

3. Debit aliran air sebesar  $Q=500$  l/detik dialirkan melalui pipa baja ( $k = 0,09$  mm). Kehilangan tenaga maksimum yang diijinkan adalah  $4$  m/km dan kekentalan air  $\nu=1,3 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/detik. Hitung diameter pipa.

Lembar Jawaban:

4. Pipa pembawa (*head race*) dengan diameter  $2,0$  m dan panjang  $3,0$  km mengalirkan air dari waduk menuju surge tank (tangki pendatar air) yang berada di dekat pabrik tenaga (*power plant*). Berapakah debit aliran apabila elevasi muka air di tangki pendatar air adalah  $7$  m di bawah elevasi muka air waduk. Koefisien gesekan  $f = 0,02$ .

Lembar Jawaban:

5. Hitung kehilangan energi pada pipa baja (*steel pipe*) dengan panjang 100 m, diameter 0,1 m, mengalirkan air dengan kecepatan 2 m/s.

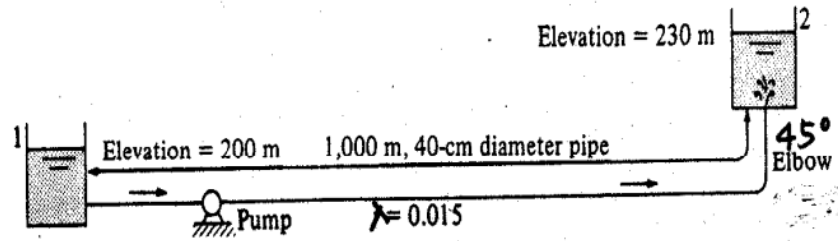
Lembar Jawaban:

6. Pipa baja diameter 3/8" panjang 10 m, mengalirkan air dengan temperatur 20°C dan debit  $Q = 0,01$  l/s. Tentukan hL.

Lembar Jawaban:

7. Calculate the head added by the pump when the water system shown below carries a discharge of  $0.27$  m<sup>3</sup>/s. If the efficiency of the pump is 80% calculate the power the

efficiency of the pump is 80% , calculate the power input required by the pump to maintain the flow.



Lembar Jawaban:

8. Pipa horisontal AB dengan panjang 2000 m dan diameternya 50 cm menghubungkan waduk di ujung A dan mesin hidraulis (turbin) di ujung B. Muka air waduk pada elevasi 60 m di atas ujung pipa A. Debit aliran adalah 500 l/d. Hitung daya turbin apabila efisiensinya 90% dan koefisien gesekan  $f = 0,020$ .

Lembar Jawaban:

9. Air dipompa dari kolam A menuju kolam B dengan beda elevasi muka air adalah 25 m, melalui pipa sepanjang 1500 m dan diameternya 15 cm. Koefisien gesekan pipa  $f = 0,02$ . Hitung daya pompa jika debit aliran 25 l/d dan efisiensi pompa 90%.

Lembar Jawaban:

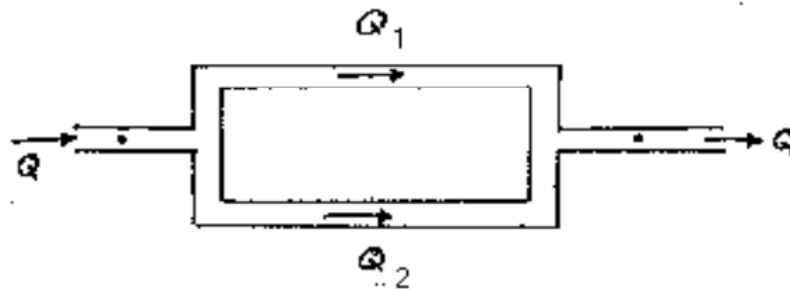
10. Air di kolam A dialirkan menuju kolam B melalui 3 buah pipa yang dihubungkan secara seri. Elevasi muka air kolam A berada 10,0 m di atas elevasi muka air kolam B. Elevasi muka air adalah konstan. Panjang dan diameter ketiga pipa adalah pipa 1  $L_1 = 650$  m,  $D_1 = 0,30$  m; pipa 2  $L_2 = 600$  m,  $D_2 = 0,20$  m, dan pipa 3  $L_3 = 650$  m,  $D_3 = 0,35$  m. Tinggi kekasaran semua pipa adalah 0,15 mm dan kekentalan kinematik  $\nu = 0,98 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/d. Hitung debit aliran melalui masing-masing pipa.

Lembar Jawaban:

11. Dua buah kolam dihubungkan oleh pipa 1, 2, dan 3 secara paralel. Diameter pipa 1, 2, dan 3 adalah  $d$ ,  $2d$ , dan  $3d$ ; sedangkan panjang dan koefisien gesekan ketiga pipa adalah sama, yaitu  $L$  dan  $f$ . Apabila debit pipa terkecil adalah 0,25 m<sup>3</sup>/d, maka hitunglah debit aliran pipa yang lain.

Lembar Jawaban:

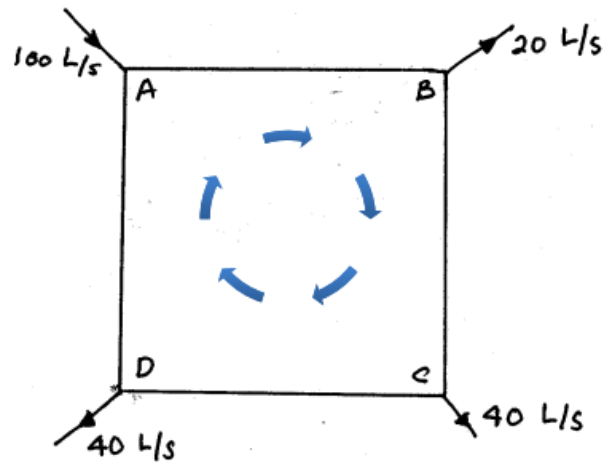
12. A pipe 6-cm in diameter, 1000 m long and with  $\lambda = 0.018$  is connected in parallel between two points M and N with another pipe 8-cm in diameter, 800-m long and having  $\lambda = 0.020$ . A total discharge of 20 L/s enters the parallel pipe through division at A and rejoins at B. Estimate the discharge in each of the pipe.



Lembar Jawaban:



13. For the square loop shown, find the discharge in all the pipes. All pipes are 1 km long and 300 mm in diameter, with a friction factor of 0.0163. Assume that minor losses can be neglected.



Lembar Jawaban:

## BAB 6

### ALIRAN MELALUI SALURAN TERBUKA

Dalam bab ini akan dipelajari aliran melalui saluran terbuka. Saluran terbuka adalah saluran dimana air mengalir dengan muka air bebas, artinya pada semua titik di sepanjang saluran, tekanan di permukaan adalah sama, yaitu tekanan atmosfer.

#### A. Kedalaman Aliran Seragam

Di dalam aliran seragam, dianggap aliran adalah mantap dan satu dimensi artinya kecepatan aliran di setiap titik pada tampang lintang adalah sama. Contoh aliran seragam adalah aliran melalui saluran irigasi yang sangat panjang dan tidak ada perubahan penampang. Kedalaman aliran di sepanjang saluran adalah konstan yang dikenal dengan kedalaman normal. Jadi profil muka air dapat diperoleh dengan hanya menghitung kedalaman aliran di suatu tampang. Dalam menghitung, dapat digunakan beberapa persamaan empirik, seperti:

Tabel 6.1. Rumus empirik kecepatan aliran di saluran terbuka

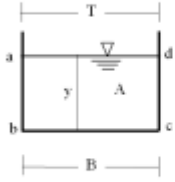

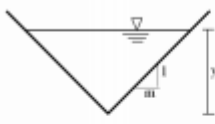
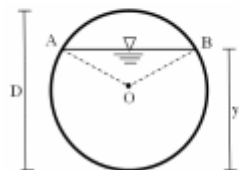
No.	Nama Rumus	Bentuk Rumus	Keterangan
1	Chezy	$V = C\sqrt{RI}$ dimana $R = \frac{A}{P}$	V : kecepatan aliran (m/s) C : koefisien Chezy I : kemiringan garis energi A : luas tampang basah (m <sup>2</sup> ) P : keliling tampang basah (m)
3	Manning	$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}$ dimana $R = \frac{A}{P}$	V : kecepatan aliran (m/s) D : diameter pipa (m) I : kemiringan garis energi R : jari – jari hidraulik (m) A : luas tampang basah (m <sup>2</sup> ) P : keliling tampang basah (m) n : koefisien manning (Tabel 6.2)

Tabel 6.2. Koefisien manning pada saluran terbuka

Dinding Saluran	Koef. Manning <i>n</i>
Besi tuang dilapis	0,014
Kaca	0,010
Saluran beton	0,013
Bata dilapis mortar	0,015
Pasangan batu disemen	0,025
Saluran tanah bersih	0,022
Saluran tanah	0,030
Sal. dengan dasar batu dan tebing rumput	0,040
Sal. pada galian batu padas	0,040

Tampang lintang saluran merupakan bentuk saluran yang tegak lurus pada arah aliran. Saluran terbuka bisa berupa saluran buatan yang mempunyai bentuk teratur seperti segi empat, trapesium, segitiga, lingkaran; dan saluran alam seperti sungai yang mempunyai bentuk tidak teratur. Aliran melalui saluran terbuka sangat dipengaruhi oleh bentuk tampang saluran, yang ditunjukkan dalam beberapa parameter aliran seperti kedalaman aliran  $y$ , luas tampang aliran  $A$ , keliling basah  $P$ , lebar muka air  $T$ , jari-jari hidraulis  $R$ , dan kedalaman hidraulis  $D$ . Rumus – rumus geometrik untuk bentuk saluran prismatis yang umum dipakai:

Tabel 6.3. Parameter geometrik untuk beberapa bentuk saluran

Bentuk	Luas, A	Keliling Basah P	Lebar Muka Air T
	$A = y B$	$P = B + 2y$	$B$
	$y (B + my)$	$B + 2y \sqrt{1 + m^2}$	$B + 2my$
	$m y^2$	$2y \sqrt{1 + m^2}$	$2m y$
	$D^2 \left[ \frac{\pi (360^\circ - 2\theta^\circ)}{4 \cdot 360^\circ} + \sin(2\theta) \right]$	$\frac{(360^\circ - 2\theta)}{360^\circ} \pi D$	$2 D \sin \theta$

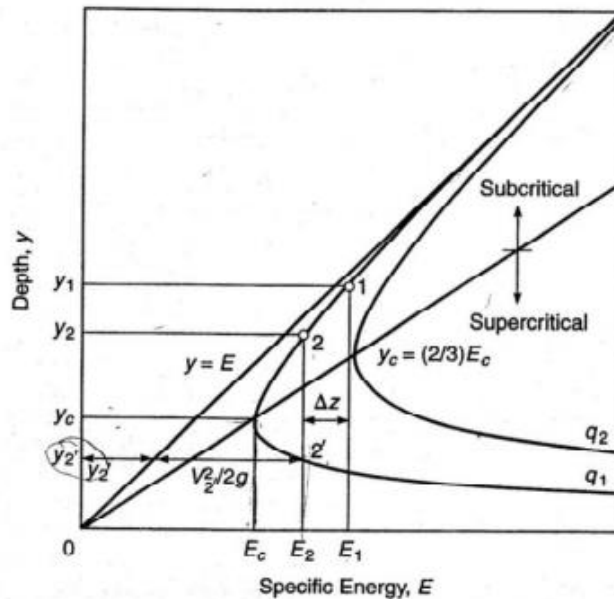
Dalam konteks di lapangan, aliran seragam akan dapat berubah menjadi aliran tidak seragam sehingga mengakibatkan profil muka air dan kecepatan aliran di sepanjang saluran tidak konstan. Perlu dilakukan penelusuran profil muka air untuk mengetahui perubahan yang terjadi, yang akan dibahas pada sub bab berikutnya.

### B. Energi Spesifik

Energi spesifik adalah energi pada tampang lintang saluran yang dihitung terhadap dasar saluran. Jadi energi spesifik merupakan jumlahan dari energi tekanan dan energi kecepatan di suatu titik, yang diberikan oleh bentuk berikut:

$$E_s = h + \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots(70)$$

Apabila dibuat hubungan antara kedalaman aliran dan energi spesifik, maka akan diperoleh kurva energi spesifik seperti pada Gambar 6.1.



Gambar 6.1. Hubungan energi spesifik dan kedalaman

Dalam gambar tersebut hubungan  $E = y$  ditunjukkan oleh garis yang membentuk sudut 45°. Kurva energi spesifik asimtotis terhadap garis dengan sudut 45°. Ketika kedalaman  $y$  menuju nol, kurva energi spesifik mendekati tak terhingga dan asimtotis terhadap sumbu  $E$ .

Nilai energi spesifik menurun sampai suatu nilai minimum pada titik C dan kemudian naik kembali (kurva AC menunjukkan nilai  $E$  menurun dan kurva CB menunjukkan nilai  $E$  bertambah). Kedalaman dan kecepatan pada titik C disebut kedalaman kritis  $y_c$ , dan kecepatan kritis  $V_c$ . Untuk setiap nilai energi spesifik, selain nilai minimum, terdapat dua kemungkinan kedalaman aliran yaitu kedalaman di atas dan di bawah nilai kritis yang disebut dengan kedalaman tinggi ( $y_2$ ) dan kedalaman rendah  $y_2'$ . Kedalaman tinggi disebut kedalaman alternatif dari kedalaman rendah, dan sebaliknya. Apabila kedalamannya lebih besar dari kedalaman kritis, kecepatan aliran akan lebih kecil dari kecepatan kritis untuk debit aliran tertentu, dan aliran disebut sub kritis atau mengalir. Sebaliknya, jika kedalamannya lebih kecil dari kedalaman kritis, aliran adalah super kritis atau meluncur.

Kedalaman kritis terjadi pada energi spesifik minimum untuk debit yang ditinjau, sehingga kondisi  $y = y_c$  dapat ditentukan dengan mendiferensialkan energi spesifik dan menyamakannya dengan nol. Untuk saluran segiempat, kedalaman kritis  $y_c/h_c$  dapat ditentukan oleh:

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gB^2}} \dots\dots\dots(71)$$

Dimana  $Q$  adalah debit aliran ( $m^3/s$ ),  $g$  adalah percepatan gravitasi ( $m/s^2$ ), dan  $B$  adalah lebar saluran ( $m$ ).

Energi spesifik minimum pada saat kondisi aliran kritis dapat ditentukan dengan rumus:

$$E_c = \frac{3}{2} h_c \dots\dots\dots(72)$$

Energi spesifik minimum adalah sama dengan tiga per dua dari kedalaman kritis. Penggunaan energi spesifik, selanjutnya dapat digunakan untuk melihat perubahan profil muka air pada aliran yang tidak seragam, seperti: saat terjadi pembendungan, pembesaran/pengecilan tampang saluran, adanya pintu air, adanya terjunan, dan sebagainya.





C. Loncat Air


Loncat air merupakan salah satu contoh aliran tidak seragam (tidak beraturan). Loncat air terjadi apabila suatu aliran superkritis berubah menjadi aliran subkritis; dan pada perubahan itu terjadi pembuangan energi. Konsep hitungan loncat air sering dipakai pada hitungan bangunan peredam energi di sebelah hilir bangunan pelimpah, pintu air, dll. Loncat air dapat terjadi pada saluran datar maupun pada saluran miring. Dalam buku ini, hanya fokus pada pembahasan loncat air yang terjadi di saluran datar.

1. Tipe Loncat Air

Menurut USBR (Biro Reklamasi Amerika Serikat), berdasarkan nilai angka Froude (Fr), loncat air pada saluran datar / horisontal dapat dibedakan menjadi 5 tipe; Fr yang dimaksud di sini adalah Fr1 (sebelum loncat air).

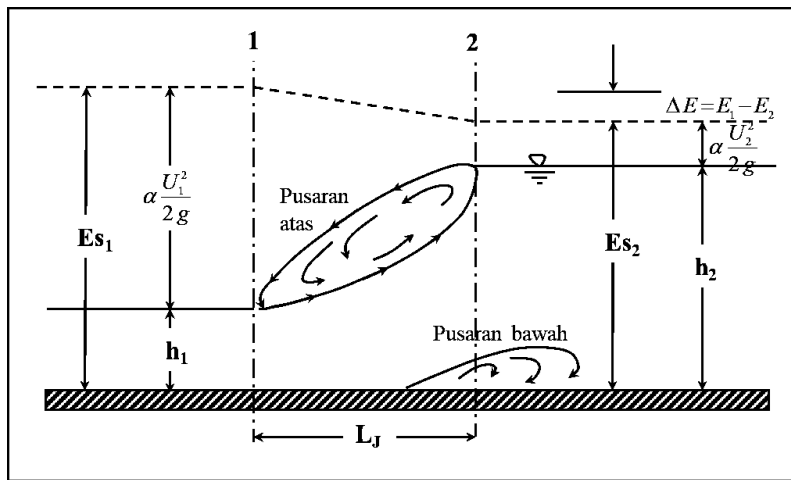
Tabel 6.4. Tipe loncat air pada saluran datar

No.	Kondisi Aliran	Tipe Loncat Air
1	Pada Angka Froude, $Fr_1 = 1 - 1.7$ , loncat air yang terjadi hanya berupa deretan gelombang berombak di permukaan air (loncatan berombak atau undular jump); pembuangan energi yang terjadi hanya berkisar 5 %.	 $F_1 = 1-1,7$ Loncatan berombak
2	Untuk angka Froude yang lebih besar, yaitu $Fr_1 = 1.7 - 2.5$ , gulungan ombak mulai pecah, dan akan timbul loncatan air yang lemah (weak jump); pembuangan energi yang terjadi berkisar 5 % - 15 %.	 $F_1 = 1,7-2,5$ Loncatan lemah
3	Pada angka Froude, $Fr_1 = 2.5 - 4.5$ akan terjadi loncatan berosilasi (oscillating jump), yang berupa loncat air dengan gelombang dibelakangnya; pembuangan energi yang terjadi berkisar 15 % - 45 %.	 Semburan berosilasi Gulungan ombak $F_1 = 2,5-4,5$ Loncatan berosilasi
4	Loncatan yang terbaik dalam peredaman energi adalah loncat air dengan Angka Froude, $Fr_1 = 4.5 - 9.0$ , yang disebut sebagai loncatan tetap (steady jump); pada loncatan ini tidak terjadi gelombang air di hilir; pembuangan energi yang terjadi berkisar 45 % - 70 %.	 $F_1 = 4,5-9,0$ Loncatan tunak

5	<p>Untuk nilai Angka Froude, <math>Fr_1 &gt; 9</math>, maka akan terjadi loncatan kuat (strong jump) yang menimbulkan gelombang air di hilirnya; pembuangan energi yang terjadi berkisar 70 % - 85 %.</p>	 <p><math>F_1 &gt; 9,0</math> Loncatan kuat</p>
---	---	---

2. Persamaan Loncat Air

Di dalam mempelajari loncat air pada saluran datar, parameter yang akan dicari adalah kedalaman air awal ( $h_1$ ), kedalaman air akhir ( $h_2$ ), kehilangan energi, dan panjang loncat air. Penurunan persamaan loncat air dilakukan dengan melihat Gambar 6.2.



Gambar 6.2. Skema terjadinya loncat air

Untuk mendapatkan rumus loncat air yang sederhana ditinjau saluran datar dengan tampang empat persegi, didapatkan persamaan mencari nilai  $h_1$  dan  $h_2$  adalah:

$$h_1 h_2 (h_1 + h_2) = \frac{2 \beta q^2}{g} \dots\dots\dots(73)$$

$$(h_1)h_2^2 + (h_1^2) h_2 - \frac{2 \beta q^2}{g} = 0 \dots\dots\dots(74)$$

$h_1$  dan  $h_2$  disebut sebagai kedalaman konjugasi (*conjugate depth*), dengan  $h_1 = initial\ depth$ , dan  $h_2 = sequent\ depth$ . Untuk  $\beta = 1$ , penyelesaian dari persamaan di atas (persamaan kuadrat) akan mendapatkan nilai  $h_2$  yang positif, yaitu:

$$h_2 = \frac{1}{2} h_1 \left( \sqrt{1 + \frac{8 q^2}{g h_1^3}} - 1 \right) \dots\dots\dots(75)$$

Mengingat bahwa pada fenomena loncat air, pengaruh gaya gravitasi sangat penting, persamaan tersebut di atas seringkali dinyatakan dalam fungsi Angka Froude ( $Fr$ ).

$$h_2 = \frac{1}{2} h_1 \left( \sqrt{1 + 8 Fr_1^2} - 1 \right) \dots\dots\dots(76)$$

dimana nilai Fr didapatkan dari persamaan berikut:

$$Fr_1 = \frac{U_1}{\sqrt{g h_1}} \rightarrow Fr_1^2 = \frac{q^2}{g h_1^3} \dots\dots\dots(77)$$

3. Kehilangan Energi pada Loncat Air

Kehilangan energi akibat loncat air adalah sama dengan perbedaan energi sebelum dan sesudah terjadinya loncat air.

$$\Delta E_s = E_{s1} - E_{s2} \dots\dots\dots(78)$$

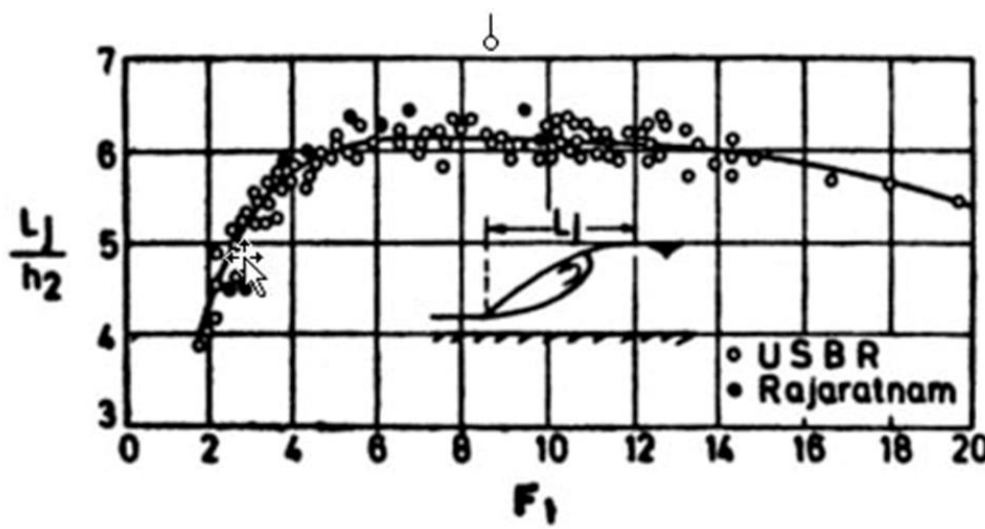
$$\Delta E_s = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4 h_1 h_2} \dots\dots\dots(79)$$

4. Panjang Loncat Air

Panjang loncat air didefinisikan sebagai jarak dari suatu titik tepat sebelum (hulu) loncatan air (pusaran) sampai dengan suatu titik tepat di belakang (hilir) pusaran. Panjang loncat air secara teoritis sukar ditentukan, dan biasanya diperoleh secara empirik.

Tabel 6.5. Rumus mencari panjang loncat air

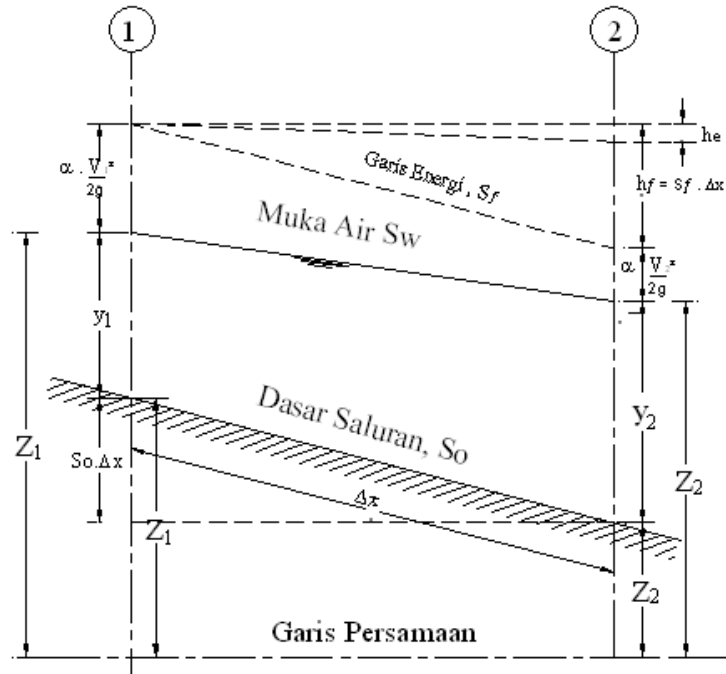
No	Peneliti	Rumus	Keterangan
1	Woyeiski (1931)	$\frac{L_j}{(h_2 - h_1)} = C - 0.05 \frac{h_2}{h_1}$	C = 8
2	Smetana (1933)	$L_j = C(h_2 - h_1)$	C = 6
3	Silvester (1964)	$L_j = 9.75 (Fr_1^2 - 1)^{1.01}$	-
4	USBR Rajaratnam	$L_j = A (h_2 - h_1)$	Berdasarkan Angka Froude



Gambar 6.3. Mencari panjang loncat air

#### D. Profil Muka Air

Penurunan persamaan dasar aliran berubah beraturan dilakukan dengan menggunakan Gambar 6.4. Gambar tersebut merupakan profil muka air dari aliran berubah beraturan pada elemen sepanjang dx yang dibatasi oleh tampang 1 dan tampang 2.



Gambar 6.4. Penurunan persamaan aliran berubah beraturan

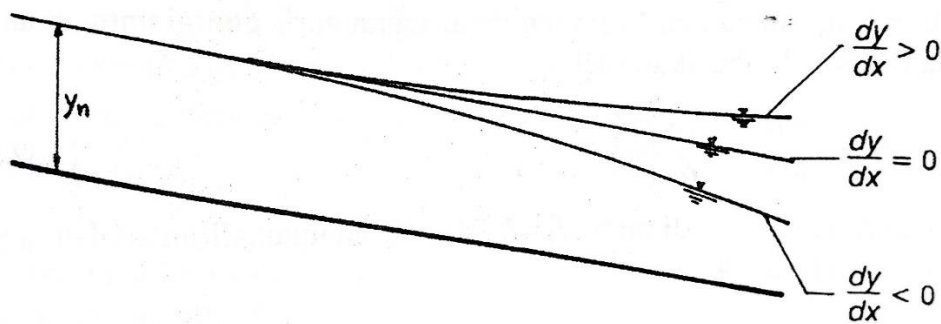
Dari hasil penurunan persamaan aliran, akan didapatkan persamaan dalam bentuk:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{I_0 - I_f}{1 - \frac{Q^2 T}{g A^3}} \dots\dots\dots(80)$$

Dimana nilai  $I_f = \frac{n^2 V^2}{R^3}$  atau  $I_f = \frac{V^2}{C^2 R}$  untuk rumus manning dan Chezy.

Persamaan di atas merupakan persamaan diferensial aliran berubah beraturan yang dapat digunakan untuk memprediksi profil muka air dari aliran melalui saluran terbuka. Berdasarkan persamaan tersebut, dapat dibedakan tiga kondisi muka air tergantung nilai  $dy/dx$ , seperti terlihat pada Gambar 6.5.





Gambar 6.5. Profil muka air dari aliran berubah beraturan

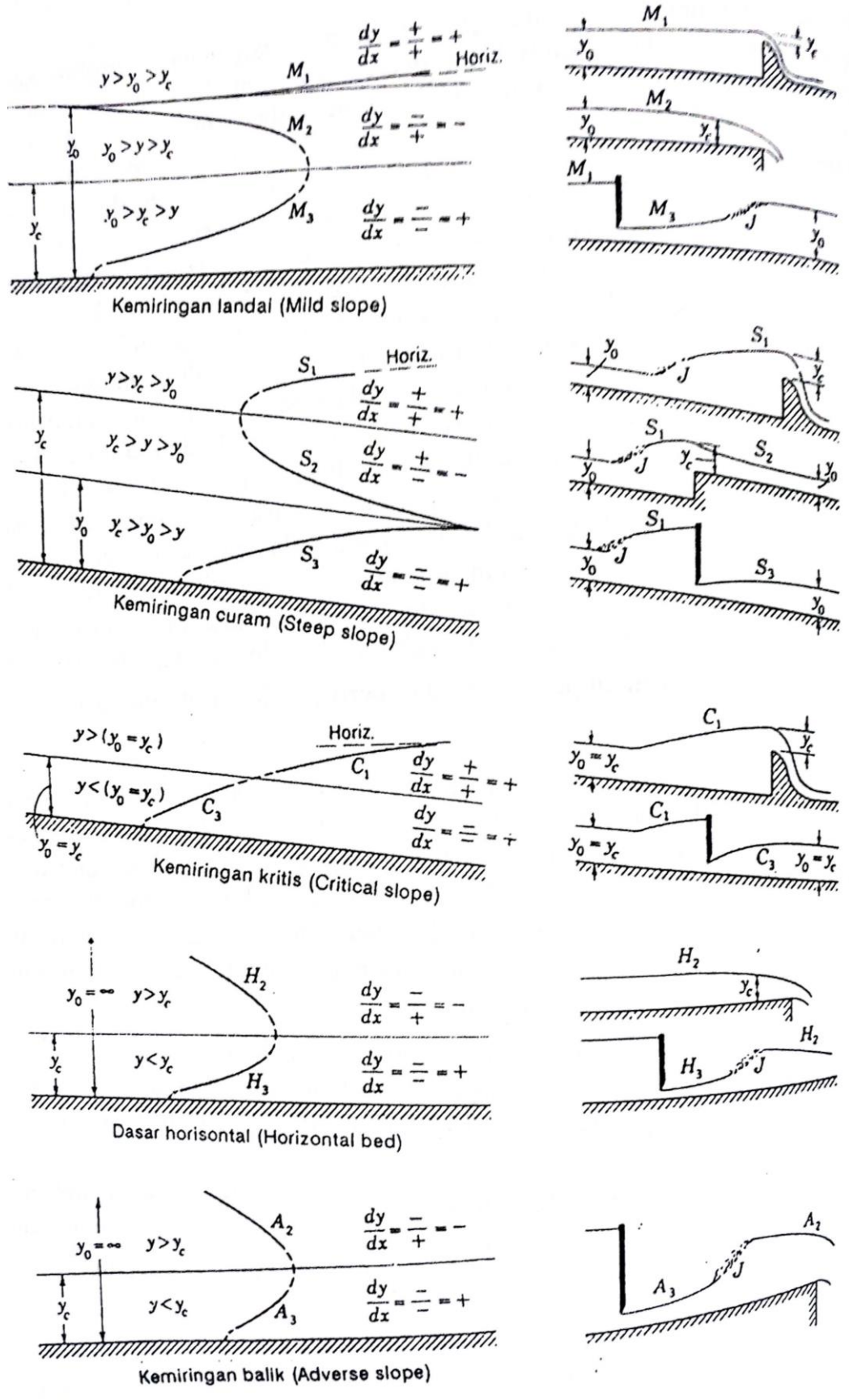
Apabila  $dy/dx = 0$ , maka muka air sejajar dengan dasar saluran, jika  $dy/dx > 0$  maka kedalaman air bertambah dengan arah aliran di sepanjang saluran, dan jika  $dy/dx < 0$  maka kedalaman aliran berkurang dengan arah aliran di sepanjang saluran.

### 1. Klasifikasi Profil Muka Aliran

Persamaan tersebut akan digunakan untuk menentukan berbagai bentuk profil muka air yang banyak dijumpai dalam aliran tidak seragam, dimana persamaan tadi dapat ditulis dalam bentuk:

$$\frac{dy}{dx} = I_0 \frac{1 - \left(\frac{y_n}{y}\right)^{10/3}}{1 - \left(\frac{y_c}{y}\right)^3} \dots\dots\dots(81)$$

Persamaan di atas menggambarkan perubahan kedalaman pada arah aliran. Profil muka air akan berubah yang tergantung pada  $I_0$  dan apakah  $y_n/y_c$  dan  $y_c/y$  lebih besar atau lebih kecil dari satu. Kemiringan dasar saluran dapat negatif, nol, atau positif. Kemiringan negatif disebut kemiringan balik, diberi simbol A (adverse slope), apabila elevasi dasar saluran bertambah dalam arah aliran. Kemiringan dasar nol apabila dasar saluran horisontal, diberi simbol H. Kemiringan positif dapat dibedakan menjadi landai (mild), kritis (critical), dan curam (steep) yang diberi simbol M, C, dan S. Aliran disebut mengalir landai apabila  $y_n > y_c$ , kritis jika  $y_n = y_c$ , dan curam apabila  $y_n < y_c$ . Gambar 6.6. menunjukkan berbagai bentuk profil muka air berdasarkan posisi muka air terhadap kedalaman kritis dan normal.



Gambar 6.6. Berbagai bentuk profil muka air

## 2. Hitungan Profil Muka Aliran

Kedalaman aliran di sepanjang saluran biasanya dapat dihitung secara bertahap dari satu tampang ke tampang berikutnya yang berjarak cukup kecil sehingga permukaan air di antara kedua tampang dapat didekati dengan garis lurus. Apabila aliran adalah subkritis hitungan dimulai dari titik paling akhir di hilir dan maju ke hulu, sedangkan apabila aliran adalah superkritis maka hitungan dapat dimulai dari hulu ke hilir. Ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk menyelesaikan, diantaranya: metode integrasi numerik, metode integrasi grafis, dan metode langkah langsung.

### a. Metode Integrasi Numerik

Metode ini dilakukan dengan pendekatan secara numerik, dimana prosedur dari metode dapat dijelaskan dengan langkah berikut.

1. Berdasarkan nilai  $y_i$  awal yang diketahui dihitung nilai  $f_i$  dari persamaan di bawah ini:

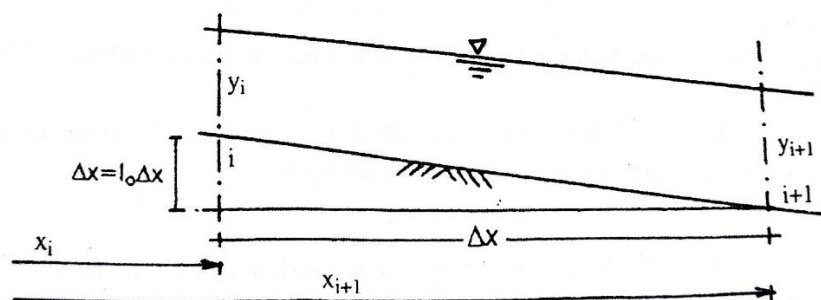
$$f = \frac{I_0 - \frac{n^2 Q^2}{4}}{A^2 R^3} = \frac{Q^2 T}{1 - g A^3}$$

2. Pertama kali dianggap bahwa  $f_{i+1} = f_i$
3. Hitung nilai  $y_{i+1}$  dari persamaan di bawah ini, dengan menggunakan nilai  $f_{i+1}$  yang diperoleh dari langkah 2 atau nilai  $f_{i+1}$  yang diperoleh dalam langkah 4.

$$y_{i+1} = y_i + \frac{f_i + f_{i+1}}{2} \Delta x$$

4. Hitung nilai baru  $y_{i+1}$  dengan menggunakan nilai  $f_{i+1}$  yang dihitung dari nilai  $y_{i+1}$  dari langkah 3
5. Apabila nilai  $y_{i+1}$  yang diperoleh dalam langkah 3 dan 4 masih berbeda jauh, maka langkah 3 dan 4 diulangi lagi.
6. Sesudah nilai  $y_{i+1}$  yang benar diperoleh, dihitung nilai  $y_{i+2}$  yang berjarak  $\Delta x$  dari  $y_{i+1}$ .
7. Prosedur di atas ulangi lagi sampai diperoleh nilai  $y$  di sepanjang saluran.

Langkah – langkah ini akan menjadi sederhana apabila dilakukan dengan menggunakan program komputer.



Gambar 6.7. Metode Integrasi numerik

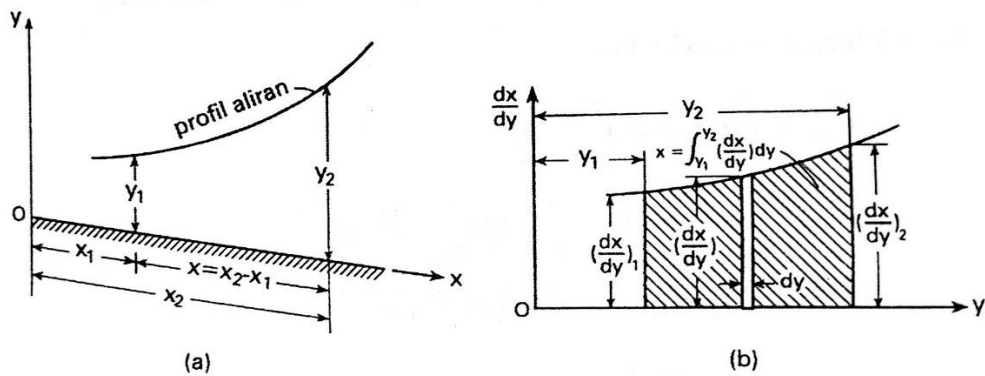
### b. Metode Integrasi Grafis

Metode ini dapat digunakan untuk semua tipe aliran berubah beraturan yang didasarkan pada integrasi secara grafis, dimana persamaan – persamaan yang digunakan adalah:

$$\frac{dx}{dy} = \frac{1 - \frac{Q^2 T}{g A^3}}{I_0 - I_f} \dots\dots\dots(82)$$

$$\int_{x_1}^{x_2} dx = \int_{y_1}^{y_2} f(y) dy = \int_{y_1}^{y_2} \frac{dx}{dy} dy = \dots\dots\dots(83)$$

Dengan menggunakan persamaan di atas untuk setiap nilai y dapat dihitung nilai dx/dy, dan selanjutnya dapat digambar grafik hubungan antara dx/dy dan y seperti terlihat dalam Gambar 6.8, dimana nilai x adalah sama dengan luasan yang diarsir, yang dibentuk oleh kurva, sumbu x dan ordinat dari dx/dy pada nilai y<sub>1</sub> dan y<sub>2</sub>.

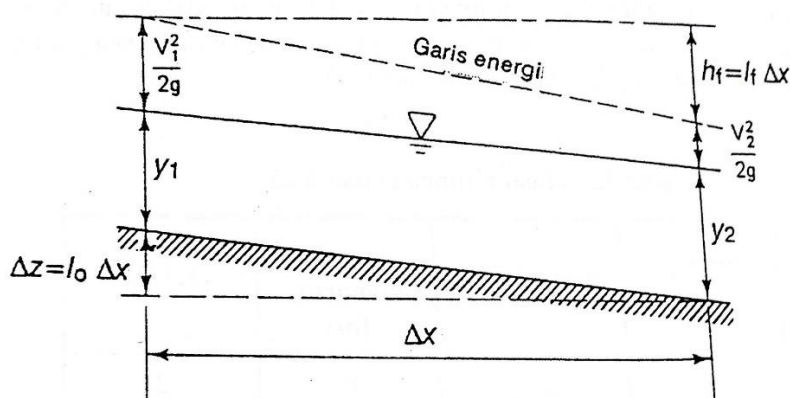


Gambar 6.8. Metode Integrasi grafis

c. Metode Langkah Langsung

Metode ini dilakukan dengan membagi saluran menjadi sejumlah pias dengan panjang Δx. Mulai dari ujung batas hilir dimana karakteristik hidraulik di tampang tersebut diketahui, dihitung kedalaman air pada tampang di sebelah hulu. Prosedur hitungan tersebut diteruskan untuk tampang di hulu berikutnya, sampai akhirnya didapatkan kedalaman air di sepanjang saluran. Apabila karakteristik aliran di kedua tampang diketahui, maka jarak antara tampang dapat diketahui dengan rumus berikut.

$$\Delta x = \frac{E_{s2} - E_{s1}}{I_0 - I_f} \dots\dots\dots(84)$$



Gambar 6.9. Metode langkah langsung

E. Latihan Soal

1. Sebuah saluran memiliki aliran dengan debit  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Saluran berbentuk persegi dengan lebar dasar  $1 \text{ m}$ , kekasaran Chezy dinding saluran  $40$ , serta kemiringan dasar  $0,001$ . Tentukan kedalaman normal aliran tersebut?

Lembar Jawaban:

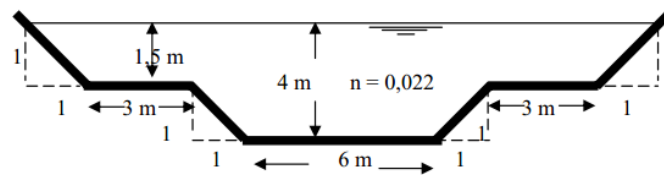
2. Sebuah saluran memiliki aliran dengan debit  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Saluran berbentuk persegi dengan lebar dasar  $1 \text{ m}$ , koefisien manning dinding saluran  $0,025$ , serta kemiringan dasar  $0,001$ . Tentukan kedalaman normal aliran tersebut?

Lembar Jawaban:

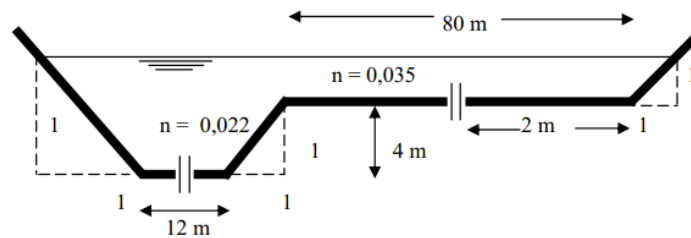
3. Suatu saluran dengan tampang trapesium mempunyai lebar dasar  $B = 5 \text{ m}$  mengalirkan debit sebesar  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ . Kemiringan dasar saluran  $S_0 = 0,0001$  dan koefisien Manning  $n = 0,021$ . Jika kemiringan kedua tebing  $m = 1$ , akan dicari kedalaman aliran seragam yang lewat saluran tersebut.

Lembar Jawaban:

4. Tentukan debit aliran sungai pada contoh 2 kasus di bawah ini, jika diketahui nilai kemiringan dasar salurannya adalah 0,001.



(a)



Lembar Jawaban:

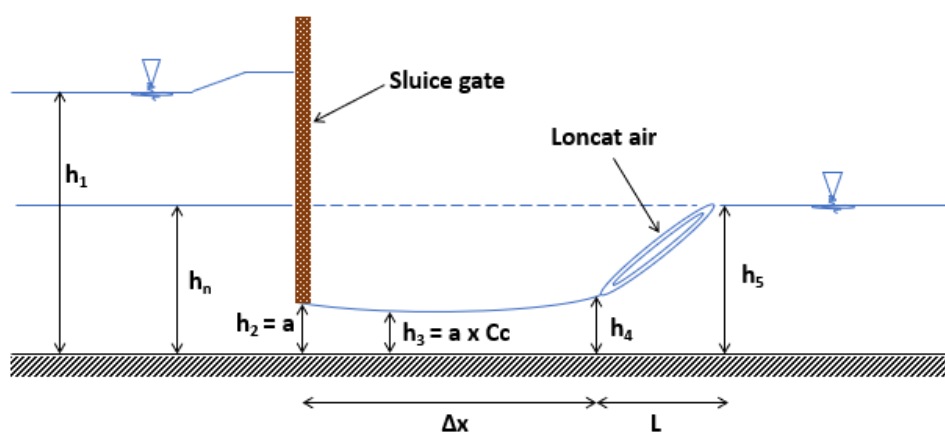
5. Sebuah saluran memiliki aliran dengan debit  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Saluran berbentuk persegi dengan lebar dasar 2 m, koefisien manning dinding saluran 0,020, serta kemiringan dasar 0,001. Tentukan:
- Kedalaman normal aliran saluran ( $h_n$ ) dan kedalaman aliran kritis ( $h_{kr}$ )
  - Gambarkan sketsa perubahan profil muka air di saluran tersebut, jika dilakukan dengan ketentuan sebagai berikut:
    1. Kondisi 1  $\rightarrow$  pembendungan dengan tinggi bendung  $\Delta z = 0,5 \text{ m}$
    2. Kondisi 2  $\rightarrow$  penyempitan lebar dasar saluran menjadi 1,5 m.
  - Berapa **tinggi bendung  $\Delta z$  yang harus diletakkan** atau **penyempitan yang harus dilakukan** (pilih salah satu) di saluran, agar dapat menaikkan muka air 0,2 m di atas kedalaman aliran normal ( $h_n$ )?

Lembar Jawaban:

6. Sebuah saluran memiliki aliran dengan debit  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Saluran berbentuk persegi dengan lebar dasar 1,5 m, kekasaran Chezy dinding saluran 45, serta kemiringan dasar 0,0015.
- Tentukan kedalaman normal aliran tersebut!
  - Apabila saluran ditinggikan sebesar 0,8 m. Berapakah tinggi muka air setelah ditinggikan?
  - Apabila saluran disempitkan menjadi 0,7 m. Berapakah tinggi muka air setelah disempitkan?
  - Gambarkan sketsa profil muka air dari poin b dan poin c!

Lembar Jawaban:

7. Saluran dengan tampang persegi dengan lebar ( $B$ ) = 1,5 m mengalirkan debit ( $Q$ ) = 1 m<sup>3</sup>/s. Kemiringan dasar saluran ( $S_o$ ) = 0,001 dan koefisien manning ( $n$ ) = 0,02. Pada saluran tersebut terdapat suatu pintu air (*sluice gate*) dengan lebar 1,5 m. Koefisien kontraksi di hilir pintu air ( $C_c$ ) = 0,75. Apabila dikehendaki elevasi muka air di hulu pintu air (*sluice gate*) naik sebesar 0,7 m di atas kedalaman air normal, maka Tentukan:
- Kedalaman air normal, kedalaman air kritis, dan kedalaman di hulu pintu air
  - Tinggi bukaan pintu air (*sluice gate*)
  - Kedalaman air sebelum dan sesudah terjadi loncat air di hilir pintu air
  - Panjang terjadinya loncat air
  - Letak kejadian awal loncat air di hilir pintu air (*sluice gate*) jika jarak dihitung dari pintu air
  - Gambarkan profil muka airnya (usahakan secara skalatis)!





Lembar Jawaban:

8. Saluran segi empat dengan lebar 3 m mengalirkan debit 15 m<sup>3</sup>/d. Kemiringan dasar 0,004 dan Koefisien Manning 0,01. pada suatu titik di saluran dimana aliran mencapai kedalaman normal, terjadi loncatan air.
- Tentukan tipe aliran
  - Kedalaman air setelah loncat air
  - Panjang loncat air
  - Kehilangan tinggi tenaga (energi) pada loncat air

Lembar Jawaban:

9. Suatu saluran segiempat dengan lebar dasar 10 m dan kemiringan dasar saluran  $S_0 = 0,0005$ ; koefisien Chezy =  $50 \text{ m}^2/\text{dt}$ , kedalaman air normal = 2,76 m. Diketahui kedalaman muka air tepat di hulu bendung sebesar 4,87 m, hitung kedalaman aliran pada 5000 m di hulu bendung.

Lembar Jawaban:

10. Suatu saluran dari waduk berbentuk segi-4 dengan lebar dasar 8 m, kekasaran dasar  $n = 0,022$ , kemiringan dasar 0,012 mengalirkan debit sebesar  $50 \text{ m}^3/\text{dt}$ . Hitung profil muka air dengan beberapa metode.

Lembar Jawaban:

11. Suatu saluran segiempat dengan lebar 5 m dan kemiringan dasar 0,005 serta koefisien Manning  $n = 0,015 \text{ m}^{-1/3} \text{ dt}$ . Pada kondisi aliran seragam, aliran mempunyai kedalaman sebesar 40 cm. Pada hilir saluran tersebut terdapat terjunan dengan kedalaman kritis berada tepat di awal terjunan.

- Tentukan kurva muka air di hulu terjunan, dan gambarkan sketsanya
- Hitung kedalaman aliran pada 10 m di hulu terjunan (gunakan interval kedalaman 5 cm).

Lembar Jawaban:

12. Suatu saluran dengan tampang segi-empat dengan lebar dasar berubah. Kemiringan dasar saluran  $S_o=0,0005$ ; koefisien Chezy =  $50 \text{ m}^{1/2}/\text{dt}$ ; jika diketahui di hilir saluran terdapat terjunan, dimana terjadi  $h$  kritik tepat di atas terjunan.; hitung kedalaman aliran pada 100m di hulu terjunan. Pada  $x=0$  :  $b=20\text{m}$ ;  $x=500$ :  $b=10$ . Kedalaman air normal jauh di hulu = 2,76 m

Lembar Jawaban:

## DAFTAR PUSTAKA

- Legono, D., 2010, Diktat Kuliah Mekanika Fluida, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
- Pratiwi, E. P. A., 2009, Review Materi Kuliah Hidraulika Saluran Terbuka, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
- Triatmodjo, B., 2016, Hidraulika I (Cetakan 15,. Beta Offset, Yogyakarta
- Triatmodjo, B., 2015, Hidraulika II (Cetakan 11), Beta Offset, Yogyakarta
- Triatmodjo, B., 2015, Metode Numerik, Beta Offset, Yogyakarta