

# Modul Mekanika Fluida



## Disusun Oleh:

Nama : Dr. Randi Purnama Putra, S.Pd., M.T.  
NIP : 198807282022031006  
Jabatan : Dosen Lektor  
Instansi/Unit Kerja : Kemdikbud/Universitas Negeri Padang

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN,  
RISET DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS NEGERI PADANG  
2022**

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis haturkan ke hadirat Allah SWT, karena berkat karunia dan rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan Draft Modul Mata Kuliah Mekanika Fluida Pada Program Studi S1 Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang” ini dengan baik. Modul ini penulis susun dalam rangka latsar CPNS Kemendikbudristek di PPSDM KEBTKE ESDM tahun 2022. Dalam prosesnya, penulis mengalami serangkaian proses yang tidak akan bisa penulis lewati tanpa bantuan dari pihak-pihak lain. Pada kesempatan ini, penulis ingin berterimakasih kepada pihak-pihak yang membantu penyelesaian laporan aktualisasi ini sebagai berikut:

1. Bapak Drs. Purwantono, M.Pd. selaku Mentor dan Kepala Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang.
2. Bapak Dr. Remon Lapisa, S.T., M.T., M.Sc selaku Koordinator Program Studi S1 Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang.
3. Bapak dan Ibu Pengajar Tim Mata Kuliah Mekanika Fluida.
4. Ibu Aspita Dyah Fajarsari, S.T., M.Eng selaku coach dari penulis dalam aktualisasi Latsar CPNS.
5. Bapak Fajar Nugroho, S.Kel, M.Si selaku Penguji dalam aktualisasi.
6. Kedua orang tua, istri, anak dan seluruh keluarga besar penulis.

Penulis sangat mengharapkan adanya masukan untuk penyempurnaan modul ini. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat konstruktif sangat ditunggu oleh penulis demi pengembangan diri maupun pengembangan keilmuan dari laporan aktualisasi ini.

Padang, 1 November 2022  
Penyusun,

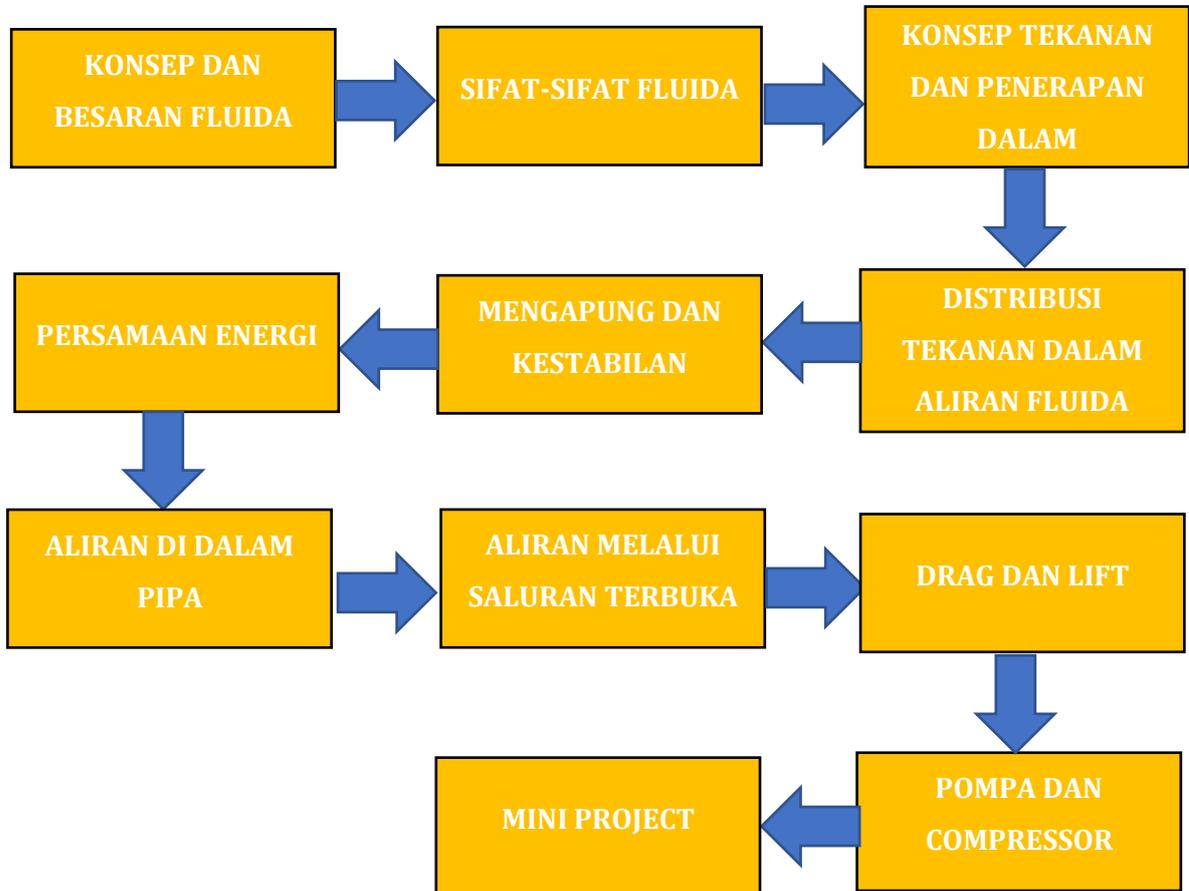
Dr. Randi Purnama Putra, S.Pd., M.T.  
NIP. 19880728 202203 1 006

## DAFTAR ISI

	<i>Hal.</i>
<b>KATA PENGANTAR</b>	ii
<b>DAFTAR ISI</b>	iii
<b>PETA JALAN MODUL</b>	v
<b>BAB I. KONSEP DAN BESARAN FLUIDA</b>	1
A. Pendahuluan	1
B. Materi Pembelajaran	1
C. Penutup	20
<b>BAB II. SIFAT-SIFAT FLUIDA</b>	23
A. Pendahuluan	23
B. Materi Pembelajaran	33
C. Soal Latihan	41
<b>BAB III. KONSEP TEKANAN DAN PENERAPAN DALAM MANOMETER</b>	42
A. Pendahuluan	42
B. Materi Pembelajaran	42
<b>BAB IV. DISTRIBUSI TEKANAN DALAM ALIRAN FLUIDA</b>	47
A. Pendahuluan	47
B. Materi Pembelajaran	47
<b>BAB V. MENGAPUNG DAN KESTABILAN</b>	61
A. Prinsip Archimedes	61
B. Kestabilan	64
C. Penutup	75
<b>BAB VI. PERSAMAAN ENERGI</b>	80
A. Penurunan Persamaan Energi	80
B. Penerapan	84
C. Penutup dan Soal Latihan	86
<b>BAB VII. ALIRAN DI DALAM PIPA</b>	92
A. Penyelesaian Aliran Berlapis	94
B. Turbulent Flow Solution	97
C. Soal Latihan	99
<b>BAB VIII. ALIRAN MELALUI SALURAN TERBUKA</b>	101
A. Pendahuluan	101

B. Materi Pembelajaran	101
C. Soal Latihan	103
<b>BAB IX. DRAG DAN LIFT</b>	104
A. Pendahuluan	104
B. Materi Pembelajaran	104
<b>BAB X. POMPA DAN COMPRESSOR</b>	112
A. Pendahuluan	112
B. Materi Pembelajaran	112
C. Soal Latihan	119
 <b>MINI PROJECT</b>	 120

## PETA KEDUDUKAN MODUL



# BAB 1

## KONSEP DAN BESARAN FLUIDA

### A. PENDAHULUAN

Materi pembelajaran pada bab ini menguraikan tentang *konsep fluida dan besaran fluida*. Materi ini menjelaskan fluida bergerak atau diam dan akibat yang ditimbulkan fluida tersebut pada lingkungannya. Pada Konsep fluida, tegangan geser yang terjadi membedakan antara *fluida dan zat padat*. Sifat-sifat fluida seperti; *Kerapatan, kekentalan dinamik dan kinematik, tegangan muka, tekanan uap* dan dimensi dan satuan merupakan besaran fluida. Penguasaan materi Mekanika fluida akan membantu mahasiswa dalam menyelesaikan masalah pada matakuliah lanjutan, sehingga dituntut kemampuan menyelesaikan masalah-masalah Mekanika fluida. Untuk mencapai kemampuan mahasiswa yang efektif/efisien maka dirancang proses pembelajaran yang inovatif dan diharapkan modul ini bisa dimanfaatkan oleh mahasiswa.

Sasaran pembelajaran pada bab ini, mahasiswa mampu berfikir kritis dalam menjelaskan sifat fluida dan membedakan aliran fluida. Bentuk pembelajaran dalam bentuk kuliah dibarengi dengan diskusi, di mana sebagai pendahuluan mahasiswa perlu dijelaskan materi pembelajaran tentang Konsep dan besaran fluida agar sasaran pembelajaran secara keseluruhan tercapai setelah mempelajari matakuliah ini.

### B. MATERI PEMBELAJARAN

**Mekanika Fluida** merupakan *telaah tentang fluida yang bergerak atau diam dan akibat yang ditimbulkan oleh fluida tersebut pada batasnya*. Pelajaran tentang aliran berintikan penarikan kompromi yang jitu antara teori dan eksperimen. Karena aliran merupakan cabang ilmu mekanika, yang memenuhi seperangkat asas kekekalan yang telah dikenal dengan baik sehingga penelaahan teoritisnyapun telah banyak dilakukan. Namun teorinya sering mengecewakan, sebab teori terutama hanya berlaku untuk situasi-situasi ideal tertentu yang berbeda dengan kenyataan (praktis). Dua hal yang menjadi penghalang utama bagi penggunaan teori yang berlaku dalam praktek ialah **Geometri dan Kekentalan**. Teori gerak

fluida umum terlalu sulit untuk dipakai dalam pemecahan masalah dengan konfigurasi geometris sembarang, sehingga pembahasan hanya pada lempeng datar, pipa lurus dan bentuk geometris lainnya yang mudah. Kekentalan hanya dapat diabaikan dalam aliran-aliran ideal tertentu, yang mana kekentalan meningkatkan kerumitan persamaan-persamaan dasar dan mengawantapkan semua, pada kecepatan rendah menimbulkan gejala acak yang tak teratur yang disebut golakan.

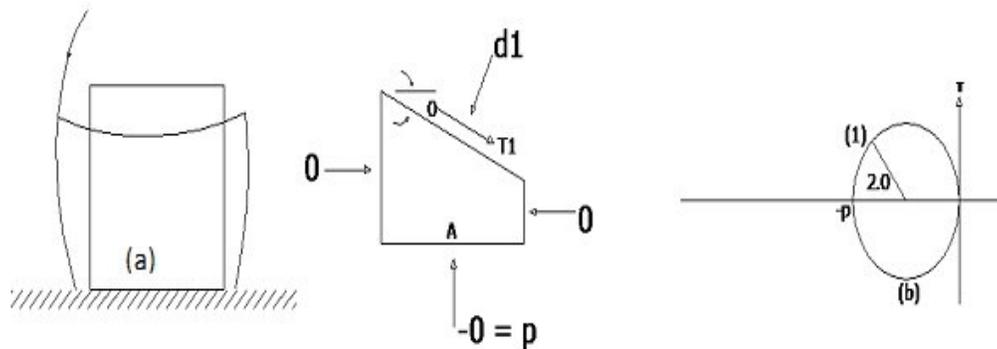
## I. KONSEP FLUIDA

Semua bahan terdiri atas dua keadaan yaitu *fluida* dan *zat padat*. Secara teknis perbedaannya terletak pada reaksi kedua zat tersebut terhadap **tegangan geser** yang dialaminya. Zat padat dapat menahan tegangan geser dengan deformasi statik sedangkan zat cair tidak. Setiap tegangan geser yang dikenakan pada fluida betapapun kecilnya, akan menyebabkan fluida itu bergerak. Fluida tersebut bergerak dan berubah bentuk terus menerus selama tegangan itu bekerja. Sehingga dikatakan bahwa fluida yang diam harus berada dalam tegangan geser nol. Dalam analisis struktur keadaan ini disebut **kondisi tegangan hidrostatis**. Pada kondisi ini lingkaran Mohr untuk tegangan menjadi titik dan tak ada tegangan geser pada sebarang bidang irisan dari bagian yang mengalami tegangan itu.

Ada dua macam fluida yaitu *zat cair* dan *gas*, perbedaan antara keduanya bersifat teknis dengan adanya gaya kohesif. Karena terdiri atas molekul-molekul tetap dimensi rapat dengan **gaya kohesif** yang relatif kuat, zat cair cenderung mempertahankan volumenya dan akan membentuk permukaan bebas dalam medan gravitasi jika tidak tertutup dari atas. Aliran muka bebas sangat dipengaruhi efek gravitasi, karena jarak antara molekul-molekulnya besar dan gaya kohesifnya terabaikan, gas akan memuai dengan bebas sampai tertahan oleh dinding yang mengungkungnya. Volume gas tidak tertentu, dan tanpa wadah yang mengungkungnya, gas tersebut akan membentuk atmosfer yang pada hakekatnya bersifat hidrostatis. Gas tidak dapat membentuk permukaan bebas, karena itu aliran gas jarang dikaitkan dengan efek gravitasi selain apungan.

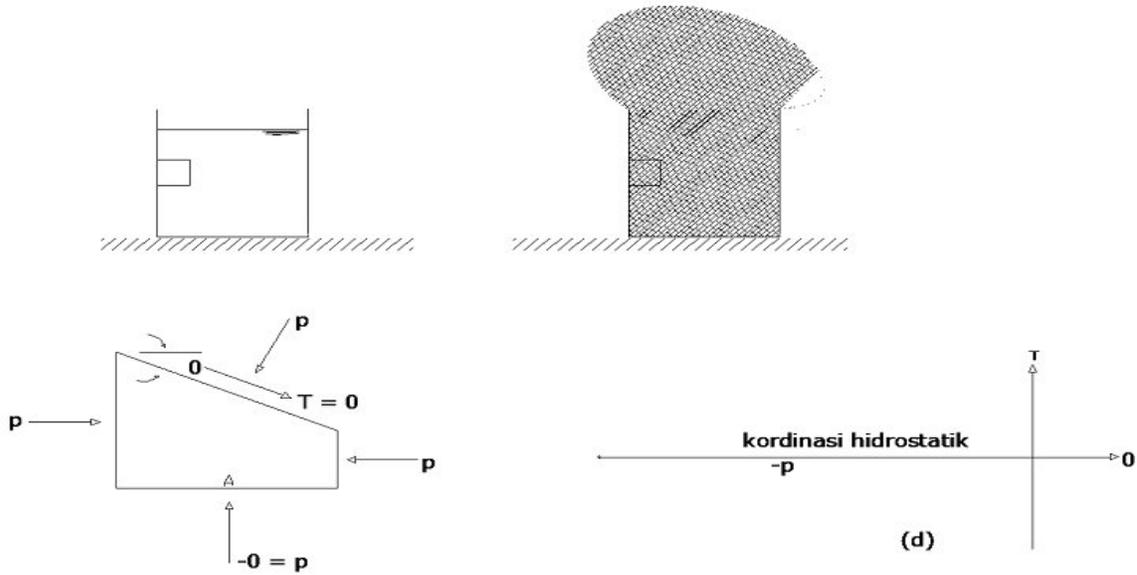
Gambar 1.1 menunjukkan sebuah balok pejal yang terletak diatas bidang datar yang tegar. Balok tertekan oleh beratnya sendiri. Peregangannya kearah defleksi statik, yang ditunjukkan dengan garis putus-putus, menahan geseran tanpa mengalir. Diagram benda

bebas untuk unsur A yang terletak disisi balok menunjukkan adanya geseran dalam balok itu di sepanjang bidang irisan yang memotongnya melalui A dengan sudut  $\theta$ . Karena balok tidak dipegang, unsur A tidak mengalami tegangan pada sisi kiri dan kanannya, sedang sisi atas dan bawahnya mendapat **tegangan tekan**  $\sigma = -p$ . Lingkaran mohr tidak tereduksi menjadi titik, dan di dalam balok ada tegangan geser yang tidak nol.



Gambar 1.1 : Zat padat diam dapat menahan geseran. (a) Defleksi Statik zat padat; (b) Keseimbangan dan lingkaran Mohr untuk unsur zat padat A

Sebaliknya zat cair dan gas dalam keadaan diam (gambar 1.2) memerlukan dinding penahan untuk menghilangkan tegangan geser. Dinding tersebut memberikan tegangan tekan  $-p$  dan mereduksi lingkaran Mohr menjadi sebuah titik dengan geseran nol dimana-mana, dengan kata lain terjadi kondisi hidrostatis. Zat cair mempertahankan volumenya dan membentuk permukaan bebas di dalam bejananya. Jika dinding bejana diambil, terjadi geseran dalam zat cair dan melampiaslah ia. Jika bejana dimiringkan, timbul geseran terjadilah gelombang dan permukaan bebas itu mencari tempat datar. Sementara gas memuai keluar dari bejananya, mengisi seluruh ruang yang ada. Unsur A dalam gas juga hidrostatis dan memberikan tegangan tekan  $-p$  pada dinding-dinding bejananya.



Gambar 1.2: Zat cair diam menahan geseran. (a) Defleksi Statik zat cair; (b) Keseimbangan dan lingkaran Mohr untuk unsur zat cair

## II. SIFAT-SIFAT FLUIDA

### 1. KERAPATAN ( $\rho$ )

Kerapatan suatu zat adalah *massa fluida dari volume satuan tersebut*. Untuk cairan Kerapatannya dianggap tetap untuk perubahan-perubahan tekanan praktis. Kerapatan air adalah  $1000 \text{ kg/m}^3$  pada  $4^\circ\text{C}$ . Lihat lampiran

Kerapatan gas dapat dihitung dengan menggunakan **persamaan keadaan gas**;

$$\frac{pv_s}{T} = R \quad (\text{Hukum Boyle dan Hukum Charles}) \dots\dots\dots (1-1)$$

Dimana; p adalah tekanan mutlak dalam pascal,  $v_s$  volume spesifik persatuan massa  $\text{m}^3/\text{kg}$ , T suhu mutlak dalam derajat Kelvin ( $273 + ^\circ\text{C}$ ) dan R tetapan gas dalam  $\text{J/kg K}$ . Karena  $\rho = 1/v_s$  persamaan diatas dapat dituliskan sebagai berikut:

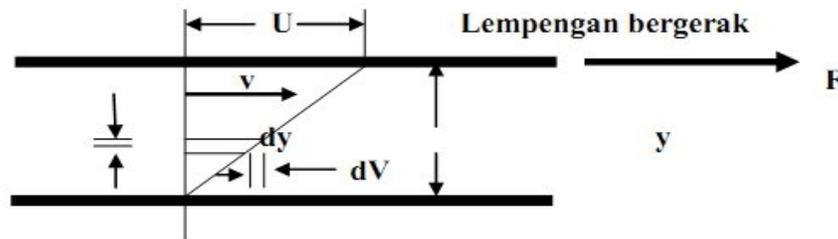
$$\rho = \frac{p}{RT} \dots\dots\dots (1-2)$$

Pada peristiwa-peristiwa khususnya yang berkenaan dengan cairan digunakan hasil kali  $\rho g = \text{berat spesifik}$  yang diberi simbol  $w$ . Dimana  $g$  merupakan percepatan gravitasi yang besarnya  $9,81 \text{ m/dtk}^2$

Kerapatan ( $\rho$ ) dan volume spesifik ( $v_s$ ) tertentu adalah invers dari satu dengan lainnya. *Kerapatan dan volume spesifik tergantung pada suhu dan tekanan fluida.* Dimana bila suhu cairan meningkat, maka densitas menurun dan volume spesifik meningkat. Karena cairan dianggap tak termampatkan (*incompressible*), peningkatan tekanan akan mengakibatkan tidak ada perubahan pada kerapatan atau volume spesifik dari zat cair. Pada kenyataannya, zat cair dapat sedikit dikompresi pada tekanan tinggi, sehingga sedikit peningkatan kerapatan dan sedikit penurunan volume dari zat cair.

## 2. KEKENTALAN (VISCOSITY)

**Kekentalan fluida** adalah *sifat yang menentukan besar daya tahan terhadap gaya geser.* Kekentalan terutama diakibatkan oleh saling pengaruh antara molekul-molekul fluida.



Gambar 1.3 : Dua lempeng sejajar terpisah pada jarak  $y$

Pada gambar 1.3, selidikilah dua lempeng sejajar, terpisah pada jarak  $y$  yang kecil, ruang antara lempeng diisi dengan suatu fluida. Andaikan lempeng bagian atas digerakkan oleh suatu gaya tetap  $F$  dan karenanya bergerak dengan kecepatan tetap  $U$ . Fluida yang bersentuhan dengan lempeng sebelah atas akan melekat kepadanya dan akan bergerak dengan kecepatan  $U$ , dan fluida yang bersentuhan dengan lempeng diam akan mempunyai kecepatan nol. Jika jarak  $y$  dan kecepatan  $U$  tidak terlalu besar, gradient kecepatan akan merupakan suatu garis lurus. Percobaan telah menunjukkan bahwa gaya

$F$  berubah-ubah bersama dengan luas lempengan, dengan kecepatan  $U$ , dan berlawanan dengan jarak  $y$ . Akibat segitiga yang sebangun,  $U/y = dV/dy$ , kita mempunyai

$$F \propto \frac{AU}{y} = A \frac{dV}{dy} \text{ atau } \frac{F}{A} = \tau \propto \frac{dV}{dy} \dots\dots\dots (1-3)$$

Dimana  $\tau = F/A =$  tegangan geser. Jika suatu tetapan kesebandingan  $\mu$  (miu) yang disebut **kekentalan dinamik**, dimasukkan;

$$\tau = \mu \frac{dV}{dy} \text{ atau } \mu = \frac{\tau}{dV/dy} \dots\dots\dots (1-4)$$

Satuan  $\mu$  adalah Pa dtk atau Psi sec. Fluida yang mengikuti hubungan persamaan (1-4) disebut **Fluida Newton**.

Koefisien kekentalan yang lain, yakni **Koefisien kekentalan kinematik**' didefenisikan sebagai;

$$\text{Koefisien kinematik} = \frac{\text{Kekentalan dinamik}}{\text{Rapat massa}}$$

Atau 
$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \dots\dots\dots (1-5)$$

Dalam buku pegangan (handbooks) dengan satuan poise dan stoke atau saybolt detik. Beberapa nilai kekentalan diberikan dalam table 1.1.

Kekentalan cairan berkurang dengan bertambahnya suhu tetapi tak cukup banyak dipengaruhi oleh perubahan tekanan. Karena rapat gas-gas berubah bersama perubahan tekanan (suhu tetap), kekentalan kinematik berubah-ubah bersama tekanan secara berlawanan.

Tabel 1.1 : Kekentalan dan kekentalan kinematik delapan fluida pada 1 atm dan 200

N o	Fluida	$\mu$ kg (m/s) <sup>□</sup>	Nisbah $\mu \mu$ (H <sub>2</sub> )	P Kg m	$\nu$ m <sup>2</sup> /s	Nisbah $\nu \nu$ (Hg)
1	Hidrogen	$8,9 \times 10^{-6}$	1,0	0,084	$1,06 \times 10^{-4}$	910
2	Udara	$1,8 \times 10^{-3}$	2,1	1,20	$1,51 \times 10^{-3}$	130
3	Bensin	$2,9 \times 10^{-4}$	33	680	$4,27 \times 10^{-7}$	3,7
4	Air	$1,0 \times 10^{-3}$	114	999	$1,01 \times 10^{-6}$	8,7
5	Ethanol	$1,2 \times 10^{-3}$	135	789	$1,51 \times 10^{-6}$	13
6	Raksa	$1,5 \times 10^{-3}$	170	13.540	$1,16 \times 10^{-7}$	1,0
7	Minyak lumas SAE 30	0,26	19.700	933	$2,79 \times 10^{-4}$	2.430
8	gliserin	1,5	168.000	1,263	$1,19 \times 10^{-3}$	10.200

1 kg/(m.s) = 0,0209 slug/(ft.s): 1 m<sup>2</sup>/s = 10,76 ft<sup>2</sup>/s

### 3. TEGANGAN MUKA

Zat cair tidak dapat mengembang dengan bebas, akan membentuk permukaan batas atau antar muka dengan zat cair lainnya atau dengan gas. Molekul-molekul yang ada dibagian dalam suatu zat cair saling bertolakan karena kerapatannya. Molekul-molekul pada permukaan zat cair lebih rendah rapatnya dan tarik menarik dengan satu sama lain. Kita dapat memperhitungkan efek-efek permukaan dalam mekanika zat cair dengan konsep tegangan muka.

Jika secarik permukaan yang panjangnya  $dL$  dibuat pada antar muka, gaya-gaya yang sama besarnya dan berlawanan arahnya, masing-masing sebesar  $Y dL$ , timbul pada arah tegak lurus pada potongan itu dan sejajar dengan permukaan tersebut.  $Y$  disebut Koefisien tegangan muka. dimensi  $Y$  adalah (F/L) dan satuannya dalam SI ialah Newton per meter (N/m) dalam system BG lbf/ft.

Dua antar muka yang paling lazim ialah air – udara dan raksa – udara. Untuk permukaan yang bersih pada 20°C = 68°F, tegangan muka terukurnya adalah;

$$Y = 0,0050 \text{ lbf/ft} = 0,073 \text{ N/m} \quad \text{udara – air}$$

$$Y = 0,033 \text{ lbf/ft} = 0,48 \text{ N/m} \quad \text{udara – raksa} \dots\dots\dots (1-6)$$

Ini adalah hasil percobaan yang terkontrol, yang dapat berubah banyak kalau permukaan itu tercemar oleh deterjen atau ceceran minyak. Pada umumnya  $Y$  mengecil dengan menurunnya suhu, dan nilainya nol pada titik genting.

Jika antar muka melengkung, keseimbangan mekanika menunjukkan bahwa ada perbedaan tekanan pada permukaan itu, dan tekanannya lebih tinggi pada bagian yang cekung. Ini dilukiskan pada gambar 1.4, pada gambar 1.4a meningkatnya tekanan pada bagian dalam suatu silinder zat cair diimbangi dengan dua gaya tegangan muka.

$$2R L \Delta p = 2 Y L$$

atau  $\Delta p = \frac{Y}{R}$  ..... 1-7

Dalam perhitungan ini tidak memperhitungkan berat zat cair tersebut. Pada gambar 1.4b, bertambahnya tekanan dibagian dalam suatu cincin gaya tegangan muka

$$\pi R^2 \Delta p = 2\pi R Y$$

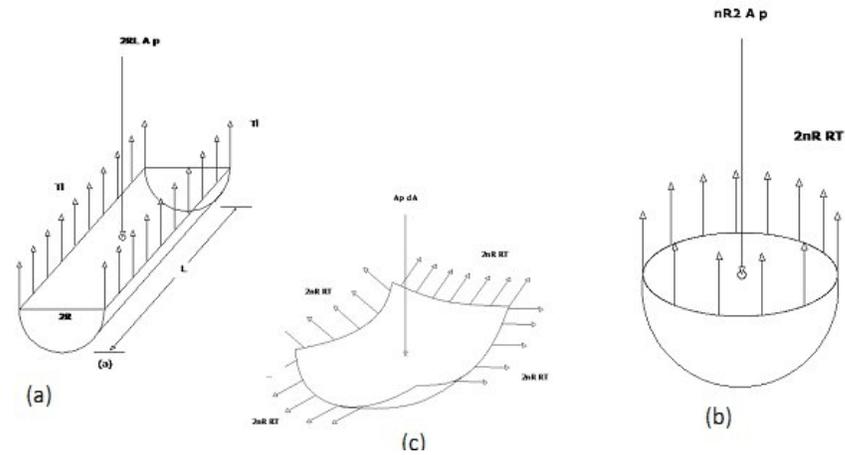
atau  $\Delta p = \frac{2Y}{R}$  ..... 1-8

Kita dapat memakai hasil ini untuk meramalkan kenaikan tekanan di dalam suatu gelembung sabun yang mempunyai dua antar muka dengan udara, satu disebelah dalam dan satunya lagi disebelah luar, dengan radius R yang hampir sama.

$$\Delta p_{gelembung} = 2\Delta p_{tetes} = \frac{2Y}{R}$$
 ..... 1-9

Gambar 1.4c menunjukkan keadaan umum, berupa suatu antar muka yang kelengkungannya sembarang, dengan jari kelengkungan R1 dan R2. Kesetimbangan gaya arah tegak lurus permukaan itu akan menunjukkan bahwa kenaikan tekanan pada bagian cekung adalah;

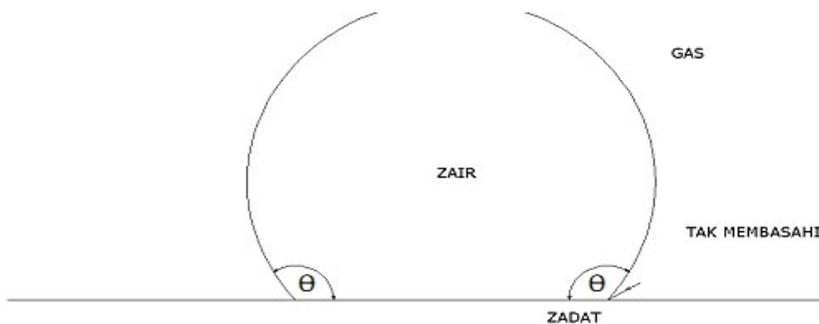
$$\Delta p = Y(R_1^{-1} + R_2^{-1})$$
 ..... 1-10



Gambar 1.4 : Perubahan tekanan melintasi antar muka lengkung karena tegangan muka;

- (a) bagian dalam suatu zat cair, (b) bagian dalam suatu permukaan bulat,
- (c) antar muka lengkung yang umum

Efek permukaan penting yang kedua ialah sudut *kontak*  $\theta$  yang terjadi bila suatu antar muka zat cair berpotongan dengan permukaan yang padat, seperti pada gambar 1.5. Keseimbangan gaya dalam hal ini menyangkut  $\gamma$  dan  $\theta$ . Jika sudut kontak kurang dari  $90^\circ$ , kita katakan zat cair *membasahi* permukaan zat padat, kalau  $\theta > 90^\circ$ , kita katakan bahwa zat cair *tak membasahi*. Misalnya air membasahi sabun tapi tidak membasahi lilin. Air sangat membasahi permukaan kaca yang bersih, dengan  $\theta \approx 0^\circ$



Gambar 1.5 : Pengaruh sudut kontak pada antar muka zat cair-igas-izat padat. Jika  $\theta < 90^\circ$ , zat cair "membasahi" zat padat; jika  $\theta > 90^\circ$ , zat cair "tak membasahi"

#### 4. TEKANAN UAP (VAPOR PRESSURE)

**Tekanan uap** ialah *tekanan pada waktu suatu zat cair mendidih dan dalam keseimbangan dengan uapnya sendiri*. Misalnya, tekanan uap air pada 68 °F adalah 49 lbf/ft<sup>2</sup>, sedangkan tekanan uap raksa hanya 0,0035 lbf/ft<sup>2</sup>. Jika tekanan zat cair lebih besar dari tekanan uap, pertukaran antara zat cair dan uap hanya terjadi dalam penguapan pada antar mukanya. Tetapi jika tekanan zat cair itu menjadi lebih rendah daripada tekanan uapnya, gelembung-gelembung uap mulai muncul di dalam zat cair tersebut. Jika air dipanaskan sampai 212 °F, tekanan uapnya naik sampai 2116 lbf/ft<sup>2</sup> sehingga pada tekanan atmosfer normal air itu akan mendidih. Jika tekanan zat cair turun dibawah tekanan uapnya, karena suatu gejala aliran, proses tersebut dinamakan **peronggaan** atau **kavitasi**. Jika air dipercepat dari keadaan diam sampai kecepatannya 50 ft/s, tekanannya turun sebesar 15 lbf/in<sup>2</sup> atau 1 atm. Ini dapat menyebabkan peronggaan.

Parameter tak berdimensi yang memberikan pendidihan yang disebabkan oleh aliran adalah **bilangan peronggaan**

$$Ca = \frac{p_a - p_v}{1/2\rho v^2} \dots\dots\dots 1-11$$

Dimana;  $p_a$  = tekanan sekitar

$p_v$  = tekanan uap

$V$  = kecepatan aliran karakteristik

Suatu aliran mempunyai nilai kritis  $Ca$  yang tergantung pada geometrinya, dibawah nilai parameter kritis aliran tersebut akan mulai mengalami peronggaan. Nilai tegangan muka dan tekanan uap air diberikan pada tabel berikut ini;

Tabel 1.2 : Tegangan Muka Udara dan Tekanan Uap air Murni

T °C	Y N/m	p <sub>v</sub> KPa
0	0,0756	0,611
10	0,0742	1,227
20	0,0728	2,337
30	0,0712	4,242
40	0,0696	7,375
50	0,0679	12,34
60	0,0662	19,92
70	0,0644	31,16
80	0,0626	47,35
90	0,0608	70,11
100	0,0589	101,33

### PERBEDAAN TEKANAN

Perbedaan tekanan antara dua titik manapun pada ketinggian yang berbeda dalam suatu cairan diberikan oleh;

$$p_2 - p_1 = \rho g (h_2 - h_1) \dots\dots\dots 1-12$$

Dimana,  $\rho g$  = satuan berat cairan (N/m<sup>3</sup>) dan  $h_2 - h_1$  = Perbedaan ketinggian (m)  
 Jika titik 1 berada dipermukaan bebas cairan dan h positif kearah bawah, persamaan di atas menjadi;

$$p = \rho gh \dots\dots\dots 1-13$$

Variasi tekanan dalam suatu fluida kompressibel biasanya sangat kecil akibat berat satuan dan perbedaan ketinggian yang kecil yang dipertimbangkan dalam perhitungan-perhitungan hidraulik. Bilamana perbedaan seperti itu harus diperhitungkan untuk perubahan dh yang kecil, hukum variasi tekanan dapat dituliskan

$$dp = -\rho g dh \dots\dots\dots 1-14$$

Tanda negatif menunjukkan bahwa tekanan berkurang bersama dengan bertambahnya ketinggian, dengan  $h$  positif ke atas.

**5. BERAT JENIS**

gravitasi standar ( $g = 32,174 \text{ ft/s}^2 = 9,80 \text{ kN/s}^2$ ), air pada temperature  $60 \text{ }^\circ\text{F}$  memiliki berat jenis  $62,4 \text{ lb/ft}^3$  dan  $9,80 \text{ kN/m}^3$ . Lihat lampiran

Berat jenis dari sebuah fluida merupakan berat fluida per satuan volume. Berat jenis berhubungan dengan kerapatan melalui persamaan;

$$\gamma = \rho g \dots\dots\dots 1-15$$

Seperti halnya kerapatan yang digunakan untuk mengkararakteristikkan massa sebuah system fluida, berat jenis digunakan mengkararakteristikkan berat dari system tersebut. Dalam system BG,  $\gamma$  mempunyai satuan  $\text{lb/ft}^3$  dan satuan SI adalah  $\text{N/m}^3$ . Dibawah kondisi

**6. GRAVITASI JENIS**

Gravitasi jenis sebuah fluida, dilambangkan sebagai SG, didefenisikan sebagai perbandingan kerapatan fluida tersebut dengan kerapatan air pada sebuah temperature tertentu. Biasanya temperature tersebut adalah  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $39,2 \text{ }^\circ\text{F}$ ) dan pada temperature ini kerapatan air adalah  $1,94 \text{ slugs/ft}^3$  atau  $1000 \text{ kg/m}^3$ . Dalam bentuk persamaan, gravitasi jenis dinyatakan sebagai

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{H_2O@40C}} \dots\dots\dots 1-16$$

Dan karena gravitasi jenis adalah perbandinagan kerapatan, nilai SG tidak tergantung pada system satuan yang digunakan.

Jelas bahwa kerapatan, berat jenis dan gravitasi jenis semuanya saling berhubungan, dan jika diketahui salah satu dari ketiganya, yang lain dapat dihitung.

### III. DIMENSI DAN SATUAN

Dimensi ialah ukuran untuk menyatakan variabel fisika secara kuantitatif. Satuan ialah suatu cara khusus untuk mengaitkan sebuah bilangan dengan dimensi kuantitatif. Jadi panjang adalah dimensi yang dikaitkan dengan variabel-variabel senantiasa berbeda-beda dari satu negara ke negara lain, yang umum digunakan **Sistem Satuan Internasional (SI)** atau **Grafitasi Inggris (BG)**.

Dalam mekanika fluida ada **empat dimensi pokok**, semua dimensi lainnya dapat diturunkan dari keempat dimensi pokok ini. Dimensi-dimensi pokok ialah **massa, panjang, waktu** dan suhu. Dimensi ini dan satuannya dalam kedua system tersebut diatas, disajikan dalam table berikut;

Tabel 1.3 : Dimensi-dimensi Pokok dalam Sistem SI dan BG

Dimensi Pokok	Satuan SI	Satuan BG	Faktor Konversi
Massa (M)	Kg	Slug	1 slug = 14,5939 kg
Panjang (L)	Meter (m)	Ft (ft)	1 ft = 0,3048 m
Waktu (T)	Sekon (s)	Sekon (s)	1 s = 1 s
Suhu ( $\theta$ )	Kelvin (K)	Rankine (R)	1 K = 1,8 R

Semua variabel lain dalam mekanika fluida dapat dinyatakan dalam, **M, L, T,  $\theta$**  ; misalnya percepatan mempunyai dimensi ( $LT^{-2}$ ). Yang paling penting dari Dimensi turunan ialah dimensi gaya, yang terkait langsung dengan massa, panjang dan waktu oleh hukum Newton kedua.

$$F = ma ; \text{ menurut dimensinya } (F) = (MLT^{-2}) \dots\dots\dots 1-17$$

Tabel 1.4 : Dimensi Turunan dalam Mekanika Fluida

Dimensi Turunan	Satuan SI	Satuan BG	Faktor Konversi
Luas ( $L^2$ )	$M^2$	$ft^2$	$1 M^2 = 10,764 ft^2$
Volume ( $L^3$ )	$M^3$	$ft^3$	$1 M^3 = 35,315 ft^3$
Kecepatan ( $LT^{-1}$ )	$m/s$	$ft/s$	$1 ft/s = 0,3048 m/s$
Percepatan ( $LT^{-2}$ )	$m/s^2$	$ft/s^2$	$1 ft/s^2 = 0,3048 m/s^2$
Tekanan atau Tegangan ( $ML^{-1}T^{-2}$ )	$Pa = N/m^2$	$lbf/ft^2$	$1 lbf/ft^2 = 47,88 N/m^2$
Kecepatan sudut ( $T^{-1}$ )	$s^{-1}$	$s^{-1}$	
Tenaga, usaha ( $ML^2T^{-2}$ )	$J = N.m$	$ft.lbf$	$1 ft.lbf = 1,3558 J$
Daya ( $ML^2T^{-3}$ )	$W = J/s$	$ft. lbf/s$	$1 ft. lbf/s = 1,3558 W$
Kerapatan ( $ML^{-3}$ )	$Kg/m^3$	$slugs/ft^3$	$1 slugs/ft^3 = 515,4 Kg/m^3$
Kekentalan ( $ML^{-1}T^{-1}$ )	$Kg/m.s$	$slugs/ft.s$	$1 slugs/ft.s = 47,88 Kg/m.s$
Bahang spesifik ( $L^2T^{-2}\theta^{-1}$ )	$M^2/s^2.K$	$ft^2/s^2.R$	$1 M^2/s^2.K = 5,980 ft^2/s^2.R$

#### IV. DASAR-DASAR ANALISIS ALIRAN

Ada tiga cara dasar untuk menyelesaikan soal aliran fluida. Ketiga cara itu sama pentingnya bagi mahasiswa yang sedang mempelajari hal tersebut yaitu :

1. Metode volume kendali atau analisis integral
2. Metode system ananta-kecil atau analisis differensial
3. Metode telaah eksperimental atau analisis dimensional

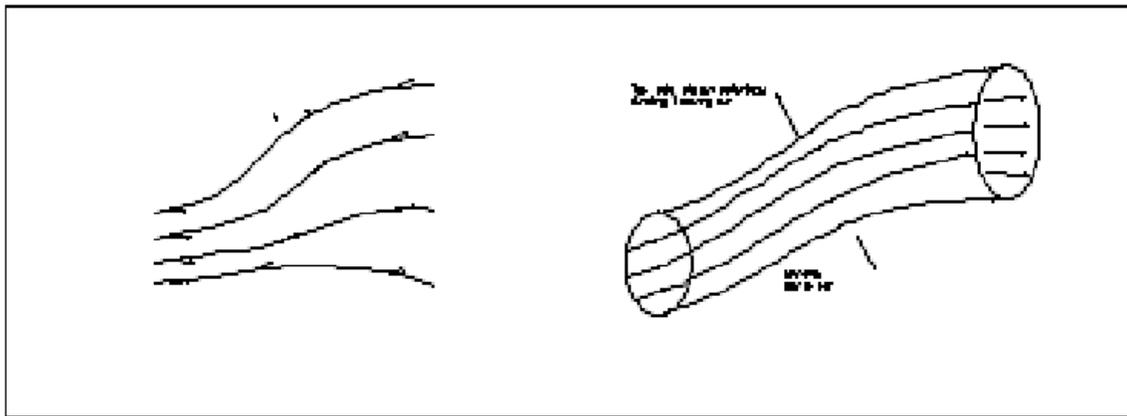
Bagaimanapun aliran tersebut harus memenuhi ketiga hukum dasar dalam mekanika ditambah hubungan keadaan termodinamika serta syarat-syarat batas yang bersangkutan :

1. Kekekalan Massa
2. Kekekalan Momentum (linier), Hukum Newton kedua
3. Kekekalan energy (hukum pertama termodinamika)
4. Suatu hubungan keadaan seperti  $\rho = \rho(p,T)$
5. Syarat-syarat batas yang sesuai pada permukaan zat padat, antar muka, lubang masuk dan lubang keluar.

## POLA-POLA ALIRAN

Ada empat type dasar pola garis aliran yang dipakai untuk menggambarkan aliran :

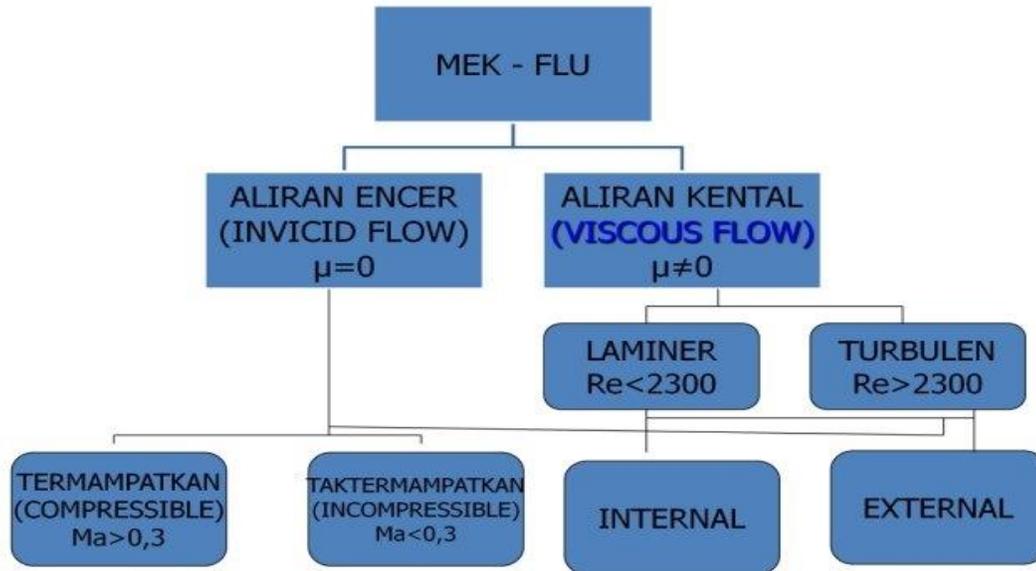
1. Garis alir (Stream lines) ; garis yang dimana-mana menyinggung vector kecepatan pada suatu saat tertentu.
2. Garis lintas (Path lines) ; lintasan yang sesungguhnya yang ditempuh partikel fluida tertentu
3. Garis alur (Streak lines) ; lokus atau tempat kedudukan partikel-partikel yang sebelumnya melalui suatu titik yang ditetapkan
4. Garis waktu (Time lines) ; himpunan partikel fluida yang pada suatu saat tertentu membentuk garis



Gambar 1.6 : Garis pola aliran fluida; (a) garis-garis alir dimana-mana menyinggung vector kecepatan local, (b) sebuah tabung alir dibentuk oleh sekumpulan garis alir yang tertutup

Garis alir mudah ditentukan secara matematika namun ketiga garis lainnya mudah ditimbulkan pada saat eksperimen. Garis alir dan garis waktu adalah garis sesaais lintast sedang gar dan garis alur terjadi dengan perjalanan waktu. Pada aliran tunak (steady flow), garis alir, garis lintas dan garis alur adalah identik seperti yang diperlihatkan pada gambar di atas

## KLASIFIKASI MEKANIKA FLUIDA



Meskipun aliran dapat diklasifikasikan, namun tidak ada kesepakatan tentang bagaimana cara melakukan pemilahan tersebut. Kebanyakan klasifikasi bersangkutan dengan asumsi-asumsi yang mendasari analisis aliran yang direncanakan. Asumsi-asumsi itu berpasangan, dan pada umumnya kita mengandalkan bahwa suatu aliran:

Tunak ( <i>Steady</i> )	atau	Tak Tunak ( <i>Unsteady</i> )
Encer ( <i>Invicid</i> )	atau	Kental ( <i>Viscous</i> )
Tak termampatkan ( <i>Incompressible</i> )	atau	Termampatkan ( <i>Compressible</i> )
Gas	atau	Cair

### CONTOH SOAL:

- 1.1. Berat jenis air pada tekanan dan temperatur normal adalah  $62.4 \text{ lb/ft}^3$  ( $9.81 \text{ kN/m}^3$ ). Berat jenis air raksa adalah 13.55. Hitung kerapatan dari air dan berat jenis serta kerapatan pada air raksa.

#### Penyelesaian:

Diketahui kerapatan dan berat jenis dari fluida sebagai berikut:

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \text{ or } \gamma = \frac{\rho}{g}$$

Dan berat jenis dari cairan adalah perbandingan dari kerapatan air murni pada suhu normal, dapat dihitung dengan :

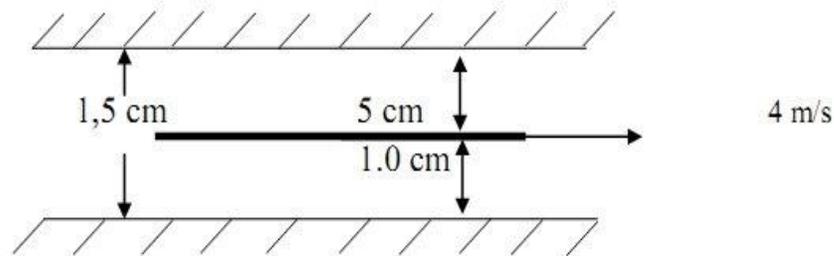
$$\rho_{\text{water}} = \frac{\gamma_{\text{water}}}{g} = \frac{62.4 \text{ lb/ft}^3}{32.2 \text{ ft/s}^2} = 1.94 \text{ slugs/ft}^3$$

$$\frac{9.81 \text{ kN/m}^3}{9.81 \text{ m/s}^2} = 1.00 \text{ Mg/m}^3 = 1.00 \text{ g/cm}^3$$

$$\gamma_{\text{mercury}} = s_{\text{mercury}} \rho_{\text{mercury}} = 13.55(1.94) = 26.3 \text{ slugs/m}^3$$

$$13.55(1.00) = 13.55 \text{ Mg/m}^3$$

- 1.2. Jarak antara dua pelat yang sejajar 1.5 cm bagian tersebut dipisahkan dengan minyak dengan kekentalan  $0.05 \text{ kg/ms}$ . Ukuran pelat yang berbentuk persegi panjang tersebut  $30 \times 60 \text{ cm}$  ditarik melalui minyak 0.5 cm dari satu pelat dan 1.00 cm dari pelat yang lain. Berapa gaya yang dibutuhkan untuk menarik pelat tersebut di  $0.40 \text{ m/s}$ ?



**Penyelesaian:**

total gaya yang mengatasi pergeseran kekentalan pada kedua permukaan pelat atas dan pelat bawah digambarkan sebagai berikut. Dengan demikian,

$$\begin{aligned}
 F_{\text{total}} &= F_{\text{atas}} + F_{\text{bawah}} \\
 &= (\text{tekanan tegangan geser atas})(\text{Luasan}) + (\text{tekanan tegangan geser})(\text{Luasan}) \\
 &= (0.050)(0.40/0.005)(0.180) + (0.050)(0.40/0.010)(0.180) \\
 &= 0.72 + 0.36 \\
 &= 1.08 \text{ N}
 \end{aligned}$$

- 1.3. Tentukan secara teoritis tinggi maksimum dari air 1500F yang dapat dinaikkan dengan sebuah ruang hampa udara pada kedalaman laut

**Penyelesaian :**

Ketinggian dari kolom zat cair yang menghasilkan tekanan di jangka waktu tinggi tekanan

$$h = \frac{p}{\gamma}$$

berat jenis pada air 1500F adalah 61.2 lbs/ft<sup>3</sup>. Di bawah ruang hampa udara sempurna air akan naik setinggi.

$$h = \frac{14.71(44)}{61.2} = 34.59 \text{ ft}$$

tinggi tekanan pada air 150<sup>0</sup>F adalah

$$h = \frac{3.72(144)}{61.2} = 8.56 \text{ ft}$$

oleh karena itu tinggi maksimum pada air akan naik sebesar;

$$h_{\text{max}} = 34.59 - 8.56 = 26.04 \text{ ft}$$

- 1.4. Temukan rumus untuk koefisien kompresi pada temperatur tetap dari gas ideal

**Penyelesaian :**

koefisien kompresi  $\alpha$ , didefinisikan dengan

$$\alpha = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T$$

Untuk gas ideal

$$P = \rho RT = \frac{mRT}{V} \text{ or } V = \frac{mRT}{P}$$

Lalu

$$\left(\frac{\partial V}{\partial p}\right) = -\frac{mRT}{p^2}$$

$$\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p}\right) = -\frac{1}{p}$$

1.5. Pada diameter berapakah tetesan air 20°C dapat memiliki tekanan dalam 1.0 kPa yang lebih besar dari tekanan luarnya?

**Penyelesaian :**

$$\sigma_{\text{water}} = 0.0728 \text{ N/m}$$

Hubungan dasar :

$$p_i + p_o = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \sigma$$

Dimana

$$R_1 = R_2 = R$$

Oleh karena itu

$$p_1 - p_0 = \sigma \frac{2}{R}$$

$$p_1 - p_0 = 1.0 \times 10^3 = 0.0728 \frac{2}{R}$$

$$R = 0.00015 \text{ m}$$

$$d = 0.3 \text{ mm}$$

## **C. PENUTUP**

Diakhir pemberian materi pada bab ini, mahasiswa *dapat menjelaskan sifat dan aliran fluida pada zat cair khususnya yang digunakan di kapal*, dan diberikan penilaian berdasarkan kejelasan uraian dengan kriteria penilaian adalah keterlibatan dan keaktifan dalam diskusi.

## TUGAS LATIHAN

Kerjakanlah tugas dibawah ini, diskusikanlah sifat dan aliran fluida pada tugas yang telah diselesaikan .

- 1.1. Berikut ini soal benar salah: (a) Fluida tidak dapat menahan tegangan geser (b) Aliran fluida dapat dianalisis tanpa teori molekul (c) Zat padat dan fluida sama-sama memenuhi hukum-hukum fisika (d) Aspal adalah suatu zat padat (e) Campuran kukus dan air adalah suatu fluida
- 1.2. Yang mana diantara hukum-hukum fisika berikut ini yang sesuai untuk menganalisis gerak fluida: (a) Hukum Boyle (b) hukum Charles (c) hukum Newton kedua (d) hukum Ohm (e) hukum pertama Termodinamika (f) hukum Hooke (g) hukum kedua Termodinamika, (h) hukum gas sempurna, (i) hukum Gibbs-Dalton ?
- 1.3. Berat jenis atau gravitasi spesifik BJ suatu gas adalah nisbah tak berdimensi antara rapatnya dan rapat udara pada keadaan standar  $20^{\circ}\text{C}$  dan 1 atm. Berapakah berat jenis hydrogen pada  $100^{\circ}\text{C}$  dan 150.000 Pa ?
- 1.4. kekentalan minyak pelumas SAE 30 pada  $20^{\circ}\text{C}$  kira-ikira 0,0092 slug/(ft.s). Berapakah kekentalannya dalam kilogram per meter sekon? Kalau berat jenisnya 57 lbf/ft<sup>3</sup>, berapakah kekentalan kinematiknya dalam meter persegi per sekon ?
- 1.5. Daya kuda adalah suatu daya yang sama dengan 550 ft.lbf/s. Berapa kilowattjam tenaga yang dipakai oleh motor 25 Hp yang bekerja selama 12 jam ?
- 1.6. Andaikan bahwa suatu zarah bergerak melingkari titik asal dengan jari-jari 2 m dan kecepatan  $v_r = 0$ ,  $v_{\theta} = 3$  m/s. Berapa percepatan radial dan percepatan singgungnya pada saat zarah tersebut melalui titik  $(x,y) = 0,2$  m ?
- 1.7. Perkirakanlah seberapa banyak berkurangnya rapat air dari nilainya pada 1 atm, kalau tekanannya diturunkan sampai nol ?
- 1.8. Minyak SAE 10 pada suhu  $20^{\circ}\text{C}$  mengalami geseran di antara dua lempeng sejajar yang jaraknya 0,01 inci. Lempeng yang dibawah tetap letaknya, sedang lempeng yang diatas bergerak dengan kecepatan 15 ft/s. Hitunglah tegangan geser dalam minyak itu ?
- 1.9. Sebatang poros yang garis tengahnya 8 cm didorong melalui selongsong yang garis tengahnya 8,02 cm dan panjangnya 30 cm. Sela antaraporos dan selongsongnya itu, yang diandaikan seragam, diisi dengan minyak dengan  $\nu = 0,005$  m<sup>2</sup>/s dan BJ= 0,9.

Kalau poros itu bergerak pada arah aksial dengan kecepatan 0,5 m/s, perkirakanlah gaya hambatan yang diberikan oleh minyak itu pada poros tersebut ?

- 1.10. Suatu gelembung sabun yang garis tengahnya 1 inci mempunyai tekanan 0,004 lbf/in<sup>2</sup> lebih tinggi dari tekanan atmosfer. Hitunglah tegangan muka antarmuka sabun- udara dalam pound gaya per ft ?
- 1.11. Suatu medan kecepatan tunak dwi-dimensi mempunyai persamaan  $u = x(1+2t)$ ,  $v = y$  Carilah persamaan garis alir yang merupakan fungsi waktu, yang semuanya melalui titik  $(x_0, y_0)$  pada suatu saat  $t$ . Gambarlah beberapa garis alir itu?

## DAFTAR PUSTAKA

1. Yunus A Cengel and J.M. Cimbala, "Fluid Mechanics: Fundamental and applications", Edisi ke-2, Mc.Graw-Hills, 2014.
2. White, F.M., 1998, Fluid Mechanics, Mcgraw-iHill, New York
3. U S Departmen of Energy, 1992, Doe Fundamental handbook, Thermodynamics, Heat transfer and Fluid Flow, Volume 3, Washington DC
4. Ranald V Giles, 1990, Mekanika Fluida dan Hidrolika, Erlangga, Jakarta
5. Fogiel, M, 1986, The Fluid Mechanics and Dinamics Problem Solver, REA, New York

## BAB II

### Sifat-Sifat Fluida

Semua fluida nyata (gas dan zat cair) memiliki sifat-sifat khusus yang dapat diketahui, antara lain: rapat massa (*density*), kekentalan (*viscosity*), kemampatan (*compressibility*), tegangan permukaan (*surface tension*), dan kapilaritas (*capillarity*). Beberapa sifat fluida pada kenyataannya merupakan kombinasi dari sifat-sifat fluida lainnya. Sebagai contoh kekentalan kinematik melibatkan kekentalan dinamik dan rapat massa.

Sejauh yang kita ketahui, fluida adalah gugusan yang tersusun atas molekul-molekul dengan jarak pisah yang besar untuk gas dan kecil untuk zat cair. Molekul-molekul itu tidak terikat pada suatu kisi, melainkan saling bergerak bebas terhadap satu sama lain.

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

Rapat massa ( $\rho$ ) adalah ukuran konsentrasi massa zat cair dan dinyatakan dalam bentuk massa ( $m$ ) persatuan volume ( $V$ ).

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (2-1)$$

Dimana:

$M$  = massa (kg)

$V$  = volume ( $m^3$ )

Rapat massa air ( $\rho$  air) pada suhu  $4^\circ C$  dan pada tekanan atmosfer ( $patm$ ) adalah  $1000 \text{ kg/m}^3$ . Berat jenis ( $\gamma$ ) adalah berat benda persatuan volume pada temperatur dan tekanan tertentu, dan berat suatu benda adalah hasil kali antara rapat massa ( $\rho$ ) dan percepatan gravitasi ( $g$ ).

$$\gamma = \rho g \quad (2-2)$$

Dimana :

$\gamma$  = berat jenis ( $N/m^3$ )

$\rho$  = rapat massa ( $kg/dt^2$ )

$g$  = percepatan gravitasi ( $m/dt^2$ )

Rapat relatif ( $s$ ) adalah perbandingan antara rapat massa suatu zat ( $\rho$ ) dan rapat massa air ( $\rho_{air}$ ), atau perbandingan antara berat jenis suatu zat ( $\gamma$ ) dan berat jenis air ( $\gamma_{air}$ ).

$$s = \frac{\rho_{zatcair}}{\rho_{air}} \text{ atau } s = \frac{\gamma_{zatcair}}{\gamma_{air}} \quad (2-3)$$

Karena pengaruh temperatur dan tekanan pada rapat massa zat cair sangat kecil, maka dapat diabaikan sehingga rapat massa zat cair dapat dianggap tetap.

### **b. Kekentalan (*viscosity*)**

Kekentalan adalah sifat dari zat cair untuk melawan tegangan geser ( $\tau$ ) pada waktu bergerak atau mengalir. Kekentalan disebabkan adanya kohesi antara partikel zat cair sehingga menyebabkan adanya tegangan geser antara molekulmolekul yang bergerak. Zat cair ideal tidak memiliki kekentalan. Kekentalan zat cair dapat dibedakan menjadi dua yaitu kekentalan dinamik ( $\mu$ ) atau kekentalan *absolute* dan kekentalan kinematis ( $\nu$ ).

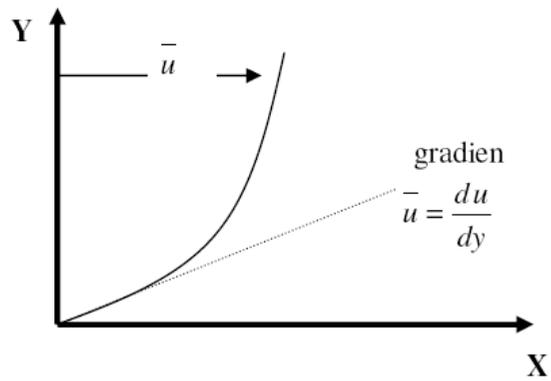
Dalam beberapa masalah mengenai gerak zat cair, kekentalan dinamik dihubungkan dengan kekentalan kinematik sebagai berikut:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2-4)$$

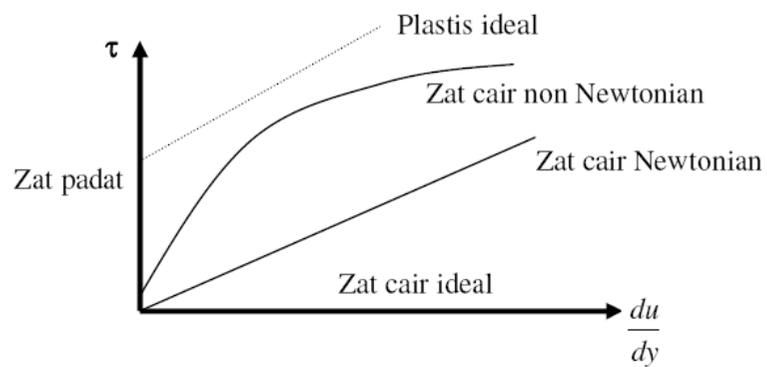
dengan  $\rho$  adalah rapat massa zat cair ( $\text{kg/m}^3$ ).

Kekentalan kinematik besarnya dipengaruhi oleh temperatur ( $T$ ), pada temperatur yang tinggi kekentalan kinematik zat cair akan relatif kecil dan dapat diabaikan.

Zat cair Newtonian adalah zat cair yang memiliki tegangan geser ( $t$ ) sebanding dengan gradien kecepatan normal ( $\frac{dy}{du}$ ) terhadap arah aliran. Gradien kecepatan adalah perbandingan antara perubahan kecepatan dan perubahan jarak tempuh aliran (Gambar 2.1). Hubungan tegangan geser dan gradien kecepatan normal dari beberapa bahan dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.1 Gradien Kecepatan



Gambar 2.2 Hubungan Tegangan geser dengan gradien kecepatan

Bila fluida Newtonian dan aliran yang terjadi adalah laminar maka berlaku hubungan:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \text{ atau } \tau = \rho \nu \frac{du}{dy} \tag{2-5}$$

dimana :

$\tau$  = tegangan geser (kg/m<sup>2</sup>)

$\mu$  = kekentalan dinamis (kg/m.det)

$\nu$  = kekentalan kinematis (m<sup>2</sup>/det)

$\rho$  = densitas fluida (kg/m<sup>3</sup>)

$\frac{du}{dy}$  = gradien kecepatan

### c. Kemampatan (*compressibility*)

Kemampatan adalah perubahan volume karena adanya perubahan (penambahan) tekanan, yang ditunjukkan oleh perbandingan antara perubahan tekanan dan perubahan volume terhadap volume awal. Perbandingan tersebut dikenal dengan modulus elastisitas ( $k$ ).

$$K = - \frac{dP}{\left(\frac{dv}{v}\right)} \quad (2-6)$$

Nilai  $k$  untuk zat air sangat besar yaitu  $2,1 \times 10^9$  N/m, sehingga perubahan volume karena perubahan tekanan akan sangat kecil dan dapat diabaikan, sehingga zat cair merupakan fluida yang tidak dapat termampatkan (*incompressible*).

### d. Tegangan permukaan (*surface tension*)

Molekul-molekul pada zat cair akan saling tarik menarik secara seimbang diantara sesamanya dengan gaya berbanding lurus dengan massa ( $m$ ) dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak ( $r$ ) antara pusat massa.

$$F = \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (2-7)$$

dengan:  $F$  = gaya tarik menarik

$m_1, m_2$  = massa molekul 1 dan 2

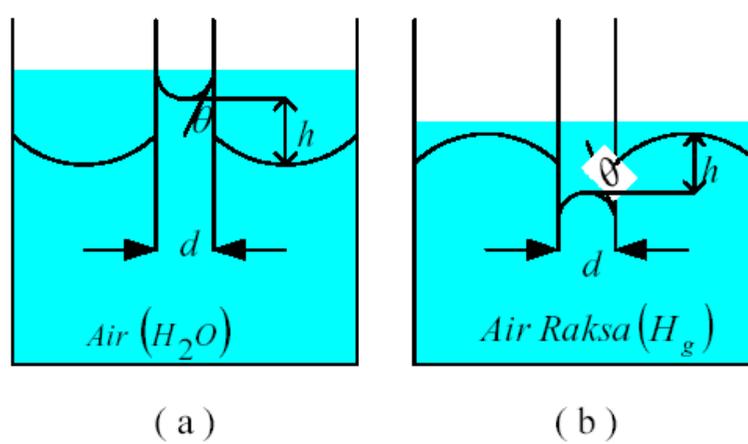
$r$  = jarak antar pusat massa molekul.

Jika zat cair bersentuhan dengan udara atau zat lainnya, maka gaya tarik menarik antara molekul tidak seimbang lagi dan menyebabkan molekul-molekul pada permukaan zat cair melakukan kerja untuk tetap membentuk permukaan zat cair. Kerja yang dilakukan oleh molekul-molekul pada permukaan zat cair tersebut dinamakan tegangan permukaan ( $\sigma$ ). Tegangan permukaan hanya bekerja pada bidang permukaan dan besarnya sama di semua titik.

### e. Kapilaritas (*capillarity*)

Kapilaritas terjadi akibat adanya gaya kohesi dan adhesi antar molekul, jika kohesi lebih kecil dari pada adhesi maka zat air akan naik dan sebaliknya jika lebih besar maka zat cair akan turun. Kenaikan atau penurunan zat cair di dalam suatu

tabung dapat dihitung dengan menyamakan gaya angkat yang dibentuk oleh tegangan permukaan dengan gaya berat.



Gambar 2.3. Kenaikan dan Penurunan Kapilaritas

Untuk perhitungan secara matematisnya yaitu:

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

Dimana:

$h$  = kenaikan atau penurunan zat cair

$\sigma$  = tegangan permukaan

$\gamma$  = berat jenis zat cair

$\theta$  = akan sama dengan  $0^\circ$  untuk air dan  $140^\circ$  untuk air raksa

$r$  = jari-jari tabung

## 1. Aplikasi Mekanika Fluida di Bidang Teknik Lingkungan

Ahli teknik yang bergerak di bidang teknik lingkungan (environmental engineering) akan berurusan dengan struktur, peralatan, dan sistem yang dirancang untuk melindungi dan meningkatkan kualitas lingkungan dan melindungi dan meningkatkan derajat kesehatan masyarakat dan kesejahteraan.

Sebagai contoh seorang ahli teknik lingkungan melakukan kegiatan perencanaan, perancangan, pembangunan dan pengoperasian bangunan pengolahan limbah dan pencegahan pencemaran di badan air. Dengan kata lain bangunan ini dibangun untuk melindungi dan meningkatkan kualitas air. Seorang ahli teknik lingkungan juga membangun dan mengoperasikan bangunan pengolahan limbah,

mengadakan air yang bersih bebas dari kuman, melindungi dan mendukung kesehatan masyarakat. Selain hal di atas teknik lingkungan juga merencanakan, merancang, membangun dan mengoperasikan peralatan untuk kontrol pencemaran udara yang hasilnya adalah orang mempunyai kesehatan yang baik dan mencegah terjadinya penurunan kualitas bahan akibat efek pencemaran udara.

Ilmu yang mendukung keahlian teknik lingkungan adalah kimia dan biologi lingkungan, hidrologi lingkungan, hidrolika lingkungan dan pnematik, pengelolaan sumber daya air, pencemaran air, pencemaran udara, pengolahan air, pengolahan air limbah, pengelolaan sampah, kontrol pencemaran udara, pengelolaan bahan berbahaya dan penilaian risiko, polusi suara dan kontrol pencegahan pencemaran, AMDAL dan permodelan kualitas lingkungan. Pada program studi strata satu diberikan dasar-dasar pengetahuan beserta aplikasi prinsip pengetahuan yang tidak terlalu rumit, dan dilanjutkan pada program studi strata dua, berupa pendalaman dari bidang ilmu strata satu dan pengetahuan lainnya yang diperlukan.

Aplikasi ilmu Mekanika Fluida atau hidrolika dalam kaitannya dengan ilmu Teknik Lingkungan terlihat dalam perencanaan bangunan air bersih, pengolahan air limbah, bendungan, bangunan pengendalian banjir, penanggulangan erosi pantai, dan pengumpulan dan distribusi air. Ilmu yang biasa digunakan adalah mengenai aliran turbulen, aliran laminar, aliran seragam dan tak seragam, debit air, persamaan kontinuitas, dan saluran terbuka atau saluran tertutup.

## 2. Persamaan Energi

Energi yang ada pada tiap satuan berat dari aliran air pada saluran terbuka terdiri dari tiga bentuk dasar, yaitu: energi kinetik, energi tekanan dan energi elevasi di atas garis datum (Hwang, 1981). Dari ketiga bentuk dasar energi tersebut akan didapatkan Persamaan Bernoulli, yang menyatakan bahwa konservasi energi merupakan bentuk persamaan energi untuk aliran tanpa geseran dasar. Persamaan Bernoulli dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{P}{\rho \cdot g} + z + \frac{U^2}{2g} = \textit{konstan} \quad (2-9)$$

dengan:

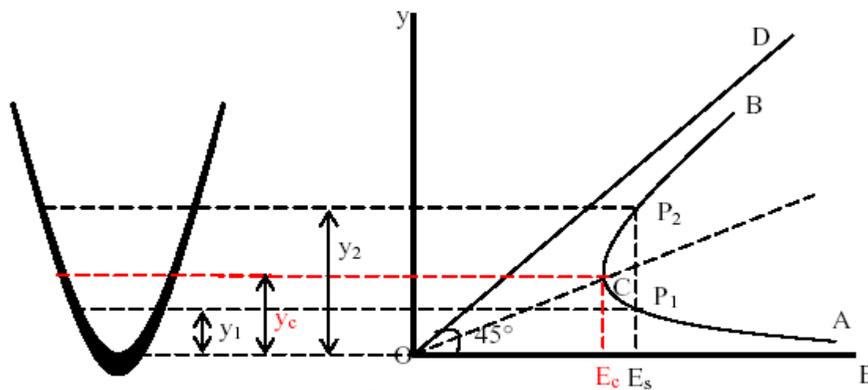
P = tinggi tekanan di suatu titik



Persamaan (2-13) menunjukkan bahwa energi spesifik sama dengan jumlah kedalaman air dan tinggi kecepatan. Karena  $U = \frac{Q}{A}$  maka persamaan (2-13) dapat ditulis menjadi:

$$E = y + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (2-14)$$

Dari persamaan (14) dapat dilihat bahwa untuk suatu penampang saluran dan debit Q tertentu, energi spesifik dalam penampang saluran hanya merupakan fungsi dari kedalaman aliran. Bila kedalaman aliran digambarkan terhadap energi spesifik untuk suatu penampang saluran dan debit tertentu seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5 , maka akan diperoleh lengkung energi spesifik. Lengkung energi spesifik memiliki 2 cabang, AC dan BC. Cabang AC mendekati sumbu mendatar secara asimtotis ke arah kanan. Sedangkan cabang BC mendekati garis OD, yang apabila diteruskan ke atas, akan menuju ke kanan. Garis OD adalah garis yang melalui titik awal dengan sudut kemiringan 45°. Untuk setiap titik P, ordinat menyatakan kedalaman, dan absis menyatakan energi spesifik yang sama dengan jumlah tinggi tekanan y dan tinggi kecepatan  $\frac{U^2}{2g}$

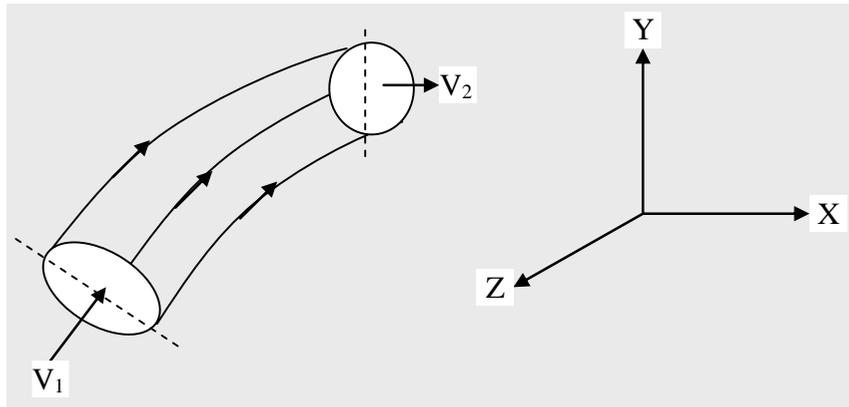


Gambar 2.5. Lengkung Energi Spesifik

### 3. Persamaan Momentum

Momentum suatu partikel atau benda : perkalian massa (m) dengan kecepatan (v). Partikel-partikel aliran fluida mempunyai momentum. Oleh karena

kecepatan aliran berubah baik dalam besarnya maupun arahnya, maka momentum partikel-partikel fluida juga akan berubah. Menurut hukum Newton II, diperlukan gaya untuk menghasilkan perubahan tersebut yang sebanding dengan besarnya kecepatan perubahan momentum. Untuk menentukan besarnya kecepatan perubahan momentum di dalam aliran fluida, dipandang tabung aliran dengan luas permukaan  $dA$  seperti pada gambar berikut :



Gambar 2.6. Penurunan Persamaan Momentum

Dalam hal ini dianggap bahwa aliran melalui tabung arus adalah permanen. Momentum melalui tabung aliran dalam waktu  $dt$  adalah :

$$dm \cdot v = \rho \cdot v \cdot dt \cdot v \cdot dA \quad (2-15)$$

$$\text{Momentum} = \rho \cdot V^2 \cdot dA = \rho \cdot A \cdot V^2 = \rho \cdot Q \cdot V \quad (2-16)$$

Dengan  $V$  dan  $Q$  adalah kecepatan rerata pada tampang aliran dan debit.

Berdasarkan hukum Newton II :

$$F = m \cdot a \quad (2-17)$$

$$F = \rho \cdot Q (V_2 - V_1) \quad (2-18)$$

Untuk masing-masing komponen (x, y, z) :

$$F_x = P \cdot Q (V_{x2} \cdot V_{x1}) \quad (2-19)$$

$$F_y = P \cdot Q (V_{y2} \cdot V_{y1}) \quad (2-20)$$

$$F_z = P \cdot Q (V_{z2} \cdot V_{z1}) \quad (2-21)$$

Resultan komponen gaya yang bekerja pada fluida :

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (2-22)$$

Persamaan momentum sering digunakan pada kondisi yang memiliki kompleksitas aliran, terutama jika kehilangan energinya belum diketahui (Sturm,

2001). Berdasarkan hukum mekanika, momentum cairan yang melalui penampang saluran per satuan waktu dinyatakan dengan:

$$\frac{\beta \cdot w \cdot Q \cdot V}{g} \quad (2-23)$$

dimana:

$\beta$  = koefisien momentum (*momentum coefficient*) atau koefisien Boussinesq

$w$  = berat isi air ( $\text{kg/m}^3$ )

$Q$  = debit ( $\text{m}^3/\text{det}$ )

$V$  = kecepatan rata-rata ( $\text{m}/\text{det}$ )

Persamaan momentum berdasarkan Hukum Newton II. Hukum Newton II menyatakan bahwa besarnya perubahan momentum pada suatu pias aliran adalah sama dengan besarnya resultante gaya-gaya yang bekerja pada

#### 4. Hukum Bernoulli

Hukum Bernoulli adalah hukum kekekalan energi mekanis didalam fluida ideal. Penurunan persamaan Bernoulli untuk aliran sepanjang garis arus didasarkan pada hukum Newton II tentang gerak ( $F = M \cdot a$ ). Persamaan ini diturunkan berdasarkan anggapan sebagai berikut ini.

- a. zat cair adalah ideal, jadi tidak mempunyai kekentalan (kehilangan energi akibat gesekan adalah nol).
- b. Zat cair adalah homogen dan tidak termampatkan (rapat massa zat cair adalah konstan).
- c. Aliran adalah kontinyu dan sepanjang garis arus.
- d. Kecepatan aliran adalah merata dalam suatu penampang.
- e. Gaya yang bekerja hanya gaya berat dan tekanan.

Dari penurunan tersebut didapat rumus umum persamaan Bernoulli yaitu:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 \quad (2-24)$$

Inilah persamaan Bernoulli yang terkenal itu, sebuah alat yang sangat berdaya guna dalam mekanika fluida. Pada tahun 1738, **Daniel Bernoulli** (1700-

1782) mempublikasikan *Hydrodinamik* yang memuat sebuah bentuk ekuivalen dari persamaan yang terkenal ini untuk pertama kalinya. Untuk menggunakan persamaan tersebut dengan tepat, kita harus selalu mengingat asumsi-asumsi dasar yang digunakan untuk menurunkan persamaan (1) efek-efek viskos dapat diabaikan, (2) alirannya diasumsikan tunak, (3) alirannya diasumsikan tak mampu-mampat, (4) persamaan tersebut dapat diterapkan hanya sepanjang sebuah garis arus. Di dalam penurunan persamaan (2), kita mengasumsikan bahwa aliran berlangsung pada sebuah bidang (bidang x-z). Secara umum, persamaan ini berlaku untuk aliran bidang atau non-bidang (tiga-dimensi), asalkan diterapkan disepanjang sebuah garis arus.

## 5. Debit Aliran

Jumlah zat cair yang mengalir melalui tampang lintang aliran tiap satu satuan waktu disebut debit aliran dan diberi notasi  $Q$ . Debit aliran biasanya diukur dalam volume zat cair tiap satuan waktu, sehingga satuannya adalah meter kubik per detik ( $m^3/dt$ ) atau satuan lain (liter/detik, liter/menit, dsb).

Dalam praktek, sering variasi kecepatan pada tampang lintang diabaikan, dan kecepatan aliran dianggap seragam di setiap titik pada tampang lintang yang besarnya sama dengan kecepatan rerata  $V$ , sehingga debit aliran adalah:

$$Q = AV \quad (2-25)$$

Dimana:

$Q$  = Debit aliran ( $m^3/dt$  atau  $lt/dt$ )

$V$  = Kecepatan aliran ( $m/dt$ )

$A$  = luas penampang ( $m^2$ )

Luas penampang ( $A$ ) tergantung dari bentuk penampang saluran

Contoh: pipa lingkaran  $A = \frac{1}{4} \pi D^2$

## 6. Jenis-Jenis Aliran

Aliran zat cair dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis seperti berikut:

### a. aliran inviscid dan viskos

Aliran inviscid adalah aliran dimana kekentalan zat cair,  $\mu$ , dianggap nol (zat cair ideal). Sebenarnya zat cair dengan kekentalan nol tidak ada di alam, tetapi

dengan anggapan tersebut akan sangat menyederhanakan permasalahan yang sangat kompleks dalam hidraulika. Karena zat cair tidak mempunyai kekentalan maka tidak terjadi tegangan geser antara partikel zat cair dan antara zat cair dan bidang batas. Pada kondisi tertentu, anggapan  $\mu=0$  dapat diterima untuk zat cair dengan kekentalan kecil seperti air.

Aliran viskos adalah aliran di mana kekentalan diperhitungkan (zat cair riil). Keadaan ini menyebabkan timbulnya tegangan geser antara partikel zat cair yang bergerak dengan kecepatan berbeda. Apabila zat cair riil mengalir melalui bidang batas yang diam, zat cair yang berhubungan langsung dengan bidang batas tersebut akan mempunyai kecepatan nol (diam). Kecepatan zat cair akan bertambah sesuai dengan jarak dari bidang tersebut. Apabila medan aliran sangat dalam/lebar, di luar suatu jarak tertentu dari bidang batas, aliran tidak lagi dipengaruhi oleh hambatan bidang batas. Pada daerah tersebut kecepatan aliran hampir seragam. Bagian aliran yang berada dekat dengan bidang batas, di mana terjadi perubahan kecepatan yang besar dikenal dengan lapis batas (*boundary layer*). Di daerah lapis batas ini tegangan geser terbentuk di antara lapis-lapis zat cair yang bergerak dengan kecepatan berbeda karena adanya kekentalan zat cair dan turbulensi yang menyebabkan partikel zat cair bergerak dari lapis yang satu ke lapis lainnya. Di luar lapis batas tersebut pengaruh tegangan geser yang terjadi karena adanya bidang batas dapat diabaikan dan zat cair dapat dianggap sebagai zat cair ideal.

#### **b. aliran kompresibel dan tak kompresibel**

Semua fluida (termasuk zat cair) adalah kompresibel sehingga rapat massanya berubah dengan perubahan tekanan. Pada aliran mantap dengan mantap dengan perubahan rapat massa kecil, sering dilakukan penyederhanaan dengan menganggap bahwa zat cair adalah tak kompresibel dan rapat massa adalah konstan. Oleh karena zat cair mempunyai kemampatan yang sangat kecil, maka dalam analisis mantap sering dilakukan anggapan zat cair tak kompresibel. Tetapi pada aliran tak mantap sering dilakukan melalui pipa di mana bisa terjadi perubahan tekanan yang sangat besar, maka kompresibilitas zat cair harus diperhitungkan.

### c. aliran laminar dan turbulen

Aliran viskos dapat dibedakan dalam aliran laminar dan turbulen. Aliran laminar terjadi apabila partikel-partikel zat cair bergerak teratur dengan membentuk garis lintasan kontinyu dan tidak saling berpotongan. Aliran laminar terjadi apabila kecepatan aliran rendah, ukuran saluran sangat kecil dan zat cair mempunyai kekentalan besar.

Pada aliran turbulen, partikel-partikel zat cair bergerak tidak teratur dan garis lintasannya saling berpotongan. Aliran turbulen terjadi apabila kecepatan aliran besar, saluran besar dan zat cair mempunyai kekentalan kecil. Aliran di sungai, saluran irigasi/drainasi dan di laut adalah contoh dari aliran turbulen.



Gambar 2.7. Aliran Laminar



Gambar 2.8. Aliran Turbulen

### d. aliran mantap (*steady flow*) dan tak mantap (*unsteady flow*)

Aliran mantap (*steady flow*) terjadi jika variabel dari aliran (seperti kecepatan  $V$ , tekanan  $p$ , rapat massa  $\rho$ , tampang aliran  $A$ , debit  $Q$ , dsb) disebarkan titik pada zat cair tidak berubah dengan waktu. Keadaan ini dapat dinyatakan dalam bentuk matematis berikut:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = 0 ; \frac{\partial p}{\partial t} = 0 ; \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 ; \frac{\partial h}{\partial t} = 0 ; \frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \quad (2-26)$$

Aliran tak mantap (*unsteady flow*) terjadi jika variabel aliran pada setiap titik berubah dengan waktu:

$$\frac{\partial v}{\partial t} \neq 0 ; \frac{\partial p}{\partial t} \neq 0 ; \frac{\partial \rho}{\partial t} \neq 0 ; \frac{\partial h}{\partial t} \neq 0 ; \frac{\partial Q}{\partial t} \neq 0 \quad (2-27)$$

Contoh aliran tak mantap adalah perubahan debit di dalam pipa atau saluran, aliran banjir di sungai, aliran di estuari (muara sungai) yang dipengaruhi pasang surut. Analisis dari aliran ini adalah sangat kompleks, biasanya penyelesaiannya dilakukan secara numerik dengan menggunakan komputer.

#### e. aliran seragam dan tak seragam

aliran disebut seragam (*uniform flow*) apabila tidak ada perubahan besar dan arah dari kecepatan dari satu titik ke titik yang lain di sepanjang aliran. Demikian juga dengan variabel-variabel lainnya seperti tekanan, rapat massa, kedalaman. Debit, dsb.

$$\frac{\partial v}{\partial s} = 0; \frac{\partial p}{\partial s} = 0; \frac{\partial \rho}{\partial s} = 0; \frac{\partial h}{\partial s} = 0; \frac{\partial Q}{\partial s} = 0 \quad (2-28)$$

Aliran di saluran panjang dengan debit dan penampang tetap adalah contoh dari aliran seragam.

Aliran tak seragam (*non uniform flow*) terjadi jika semua variabel aliran berubah dengan jarak, atau:

$$\frac{\partial v}{\partial s} \neq 0; \frac{\partial p}{\partial s} \neq 0; \frac{\partial \rho}{\partial s} \neq 0; \frac{\partial h}{\partial s} \neq 0; \frac{\partial Q}{\partial s} \neq 0 \quad (2-29)$$

Contoh dari aliran tak seragam adalah aliran di sungai atau di saluran di daerah dekat terjunan atau bendung.

#### f. aliran satu, dua dan tiga dimensi

Dalam aliran satu dimensi (1-D), kecepatan di setiap titik pada tampang lintang mempunyai besar dan arah yang sama. Sebenarnya jenis aliran semacam ini sangat jarang terjadi. Tetapi dalam analisa hidraulika, aliran tiga dimensi dapat disederhanakan menjadi satu dimensi berdasarkan beberapa anggapan, misalnya mengabaikan perubahan kecepatan vertikal dan melintang terhadap kecepatan pada arah memanjang. Keadaan pada tampang lintang adalah nilai rerata dari kecepatan, rapat massa, dan sifat-sifat lainnya.

Dalam aliran dua dimensi (2-D), semua partikel dianggap mengalir dalam bidang sepanjang aliran, sehingga tidak ada aliran tegak lurus pada bidang tersebut. Untuk aliran di saluran yang sangat lebar, misalnya di pantai, maka anggapan aliran dua dimensi mendatar adalah lebih sesuai.

Kebanyakan aliran di alam adalah tiga dimensi, di mana komponen kecepatan  $u, v,$  dan  $w$  adalah fungsi dari koordinat ruang  $x, y,$  dan  $z$ . analisa dari aliran ini adalah sangat sulit.

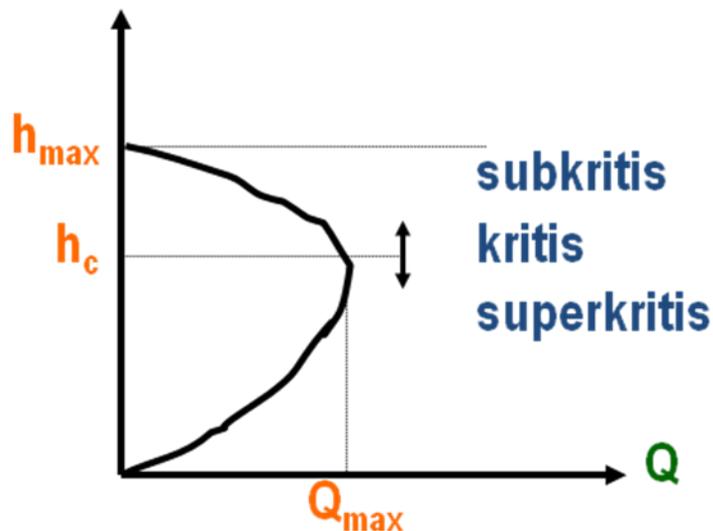
### g. aliran rotasional dan tak rotasional

Aliran rotasional terjadi apabila setiap partikel zat cair mempunyai kecepatan sudut terhadap pusat massanya. Partikel zat cair akan berotasi apabila distribusi kecepatan tidak merata. Pada aliran tak rotasional, distribusi kecepatan di dekat dinding batas merata sehingga partikel zat cair tersebut tidak berotasi terhadap pusat massanya.

## 7. Aliran Kritis, Subkritis dan Superkritis

Aliran kritis merupakan kondisi aliran yang dipakai sebagai pegangan dalam menentukan dimensi bangunan ukur debit. Pada kondisi tersebut, yang disebut sebagai keadaan aliran modular bilamana suatu kondisi debitnya maksimum dan energi spesifiknya adalah minimum.

Fenomena aliran modular pada pintu yang diletakkan di atas ambang untuk satu energi spesifik yang konstan ( $E_0$ ) dapat diidentifikasi melalui 3 (tiga) kondisi seperti berikut :

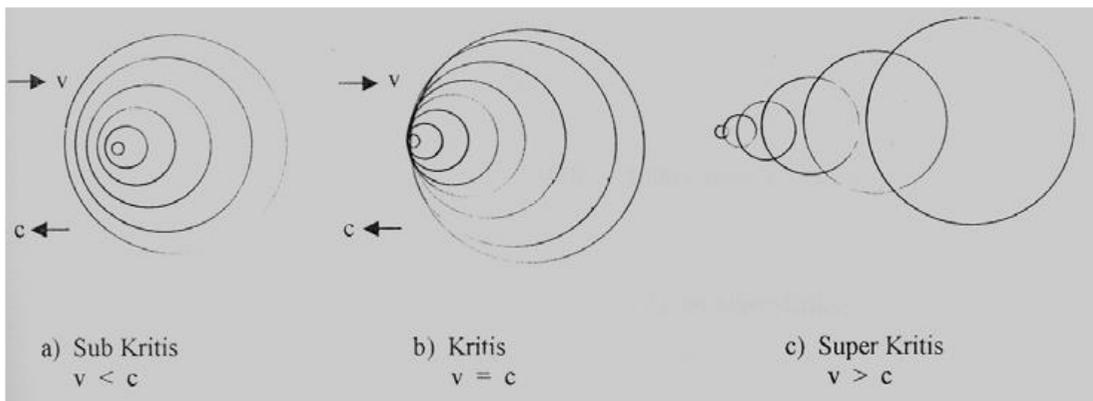


Gambar 2.9. Hubungan antara debit dan tinggi air pada kondisi energi spesifik konstan

Aliran subkritis dan aliran superkritis dapat diketahui melalui nilai bilangan Froude ( $F$ ) . Bilangan Froude tersebut membedakan jenis aliran menjadi tiga jenis yakni: Aliran kritis, Subkritis dan superkritis (Queensland Department of

Natural Resources and Mines, 2004). Ketiga jenis aliran dapat dijelaskan sebagai berikut:

- a) Aliran kritis, jika bilangan Froude sama dengan 1 ( $Fr = 1$ ) dan gangguan permukaan (cth: riak yang terjadi jika sebuah batu di lempar ke dalam sungai) tidak akan bergerak/menyebar melawan arah arus.
- b) Aliran subkritis, jika bilangan Froude lebih kecil dari 1 ( $Fr < 1$ ). Untuk aliran subkritis, kedalaman biasanya lebih besar dan kecepatan aliran rendah (semua riak yang timbul dapat bergerak melawan arus). Kecepatan air  $<$  kecepatan gelombang hulu aliran dipengaruhi pengendali hilir.
- c) Aliran superkritis, Jika bilangan Froude lebih besar dari 1 ( $Fr > 1$ ). Untuk aliran superkritis kedalaman relative lebih kecil dan kecepatan relative tinggi (segala riak yang ditimbulkan dari suatu gangguan adalah mengikuti arah arus. Kecepatan air  $>$  kecepatan gelombang hulu aliran tidak dipengaruhi pengendali hilir.



Gambar 2.10. Gelombang Kritis, Subkritis, dan Superkritis

Rumus Bilangan Froude :

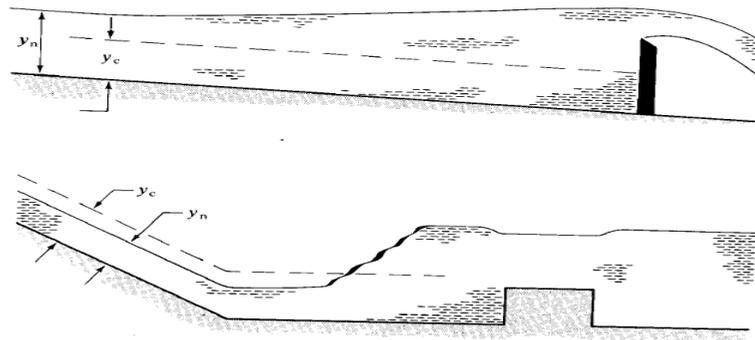
$$\frac{v^2}{2gD} = 1 \text{ atau } \frac{v}{\sqrt{2gD}} = Fr = 1 \quad (2-30)$$

Untuk saluran yang berbentuk trapezium, bilangan Froude dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Fr = \left[ \frac{V^2 (b + 2Zy)}{g y (b + Zy)} \right]^{0.5} \quad (2-31)$$

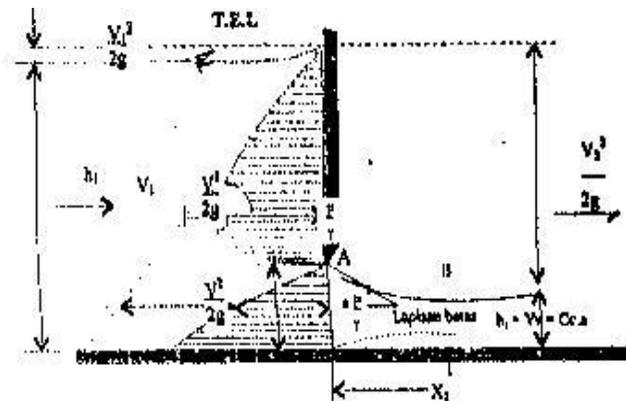
Dimana:

- Fr = bilangan Froude
- V = rata-rata kecepatan aliran (m/dtk)
- b = bottom width (m)
- Z = rasio kemiringan sisi
- g = gaya gravitasi (9.8 m/dtk)
- y = kedalaman aliran (m)



Gambar 2.11. Aliran Subkritis dan Superkritis

Contoh penerapan aliran kritis, subkritis dan superkritis yaitu Aliran Melalui Pintu Sorong / Gerak]. Kondisi aliran melalui pintu sorong (*Sluice gate*) akan tampak jelas apakah dalam kondisi aliran bebas atau tenggelam, tergantung dari kedalaman air di hilir pintu yang secara bergantian ditentukan oleh kondisi aliran di hilir pintu tersebut. Kondisi aliran bebas (*free flow*) dicapai bila aliran di hulu pintu adalah sub kritis, sedangkan aliran di hilir pintu adalah super kritis sebagaimana diperlihatkan dalam gambar berikut :



Gambar 2.12. Sketsa aliran bebas melalui bawah pintu (Henderson, 1966)

Persamaan kedalaman kritis dapat diperoleh dengan mendiferensiasikan Es

$$E_s = y + \frac{\alpha(Q/A)^2}{2g}$$

$$\frac{dE_s}{dy} = 0 = 1 + \frac{\alpha Q^2}{2g} \frac{d}{dA} \left( \frac{1}{A^2} \right) \frac{dA}{dy} \quad (2-32 \& 2-33)$$

Karena  $\delta A = B \delta y$  dengan limit  $dA/dy = B$

$$0 = 1 - \frac{\alpha Q^2}{2g} B_c 2 A_c^{-3}$$

$$\frac{\alpha Q^2 B_c}{g A_c^3} = 1 \quad (2-34 \& 2-35)$$

Karena  $Q = q b$ ,  $B = b$  dan  $A = by$  dan mengambil  $a = 1$

$$V_c y_c = q \quad (2-36)$$

$$y_c = \left( \frac{q^2}{g} \right)^{1/3} \quad (2-37)$$

$$V_c = \sqrt{g y_c} \quad (2-38)$$

Substitusi  $Y_c$  ke persamaan energi maka akan diperoleh

$$E_{sc} = y_c + \frac{V_c^2}{2g} = y_c + \frac{y_c}{2}$$

$$y_c = \frac{2}{3} E_{sc} \quad (2-39)$$

Contoh soal:

Saluran dengan lebar 6 meter mengalirkan air 20 m<sup>3</sup>/det. Tentukan kedalaman air ketika energi spesifik dari aliran minimum.

Diket:  $Q = 20$  m<sup>3</sup>/det

$$b = 6 \text{ m}$$

$$q = Q/b = 20/6 = 3,33 \text{ m}^3/\text{det (permeter lebar aliran)}$$

Ditanyakan:  $y_c$ ?

Jawab:

$$y_c = (q^2/g)^{1/3}$$

$$= (3,33^2/9,81)^{1/3}$$

$$= 1,04 \text{ m}$$

Apabila kedalaman suatu aliran melebihi kedalaman kritis, kecepatan aliran lebih kecil dari pada kecepatan kritis untuk suatu debit tertentu, dan aliran disebut sub-kritis. Akan tetapi bila kedalaman aliran kurang dari kedalaman kritis, aliran disebut super-kritis.

### SOAL LATIHAN

1. Tangki baja tahan tekanan tinggi berisi zat cair, yang pada tekanan 10 atmosfer mempunyai volume 1.232 liter. Pada tekanan 25 atmosfer volume zat cair adalah 1.231 liter. Berapakah modulus elastisitas zat cair? (1 atmosfer (h) = 10,34 m air, 1 liter = 0,001 m<sup>3</sup>, ( $P = \rho \cdot g \cdot h$ )).
2. Saluran dengan lebar 7 meter mengalirkan air 23 m<sup>3</sup>/det. Tentukan kedalaman air ketika energi spesifik dari aliran minimum.
3. Tangki baja berisi minyak A dan air B. Di atas minyak terdapat udara yang bisa di ubah tekanannya. Dimensi yang ada pada Gambar adalah pada tekanan atmosfer. Apabila tekanan dinaikan sampai 1 M Pa, berapakah penurunan volume total. Modulus elastisitas zat cair adalah 2050 MN/m<sup>2</sup> untuk minyak dan 2075 MN/m<sup>2</sup> untuk air. Di anggap tangki tidak mengalami perubahan volume.
4. Tekanan statis adalah sedemikian rupa sehingga air naik didalam tabung kaca sampai setinggi 7 cm. Apabila diameter tabung adalah 0,5 cm dan temperatur air adalah 20° C. Hitung tinggi total pada mana air didalam tabung akan bertahan.  
 $t=20^\circ \longrightarrow$  Tegangan geser =  $7,36 \times 10^{-2}$ N/m Tabung kaca bersih sudut =0

### DAFTAR PUSTAKA

1. Yunus A Cengel and J.M. Cimbala, "Fluid Mechanics: Fundamental and applications", Edisi ke-2, Mc.Graw-Hills, 2014.
2. White, F.M., 1998, Fluid Mechanics, Mcgraw-iHill, New York.
3. U S Departmen of Energy, 1992, Doe Fundamental handbook, Thermodynamics, Heat transfer and Fluid Flow, Volume 3, Washington DC.
4. Ranald V Giles, 1990, Mekanika Fluida dan Hidrolika, Erlangga, Jakarta.
5. Fogiell, M, 1986, The Fluid Mechanics and Dinamics Problem Solver, REA, New York

# **BAB III**

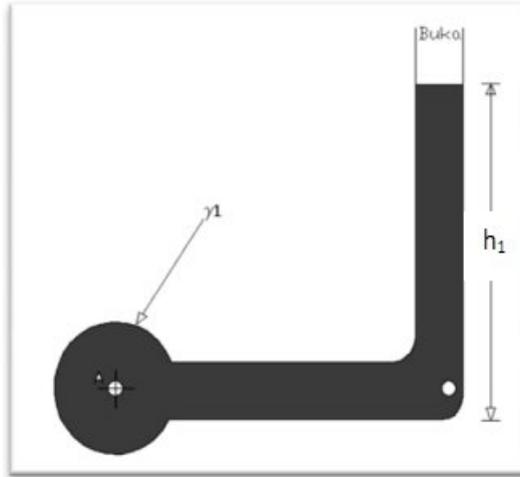
## **KONSEP TEKANAN**

### **PENERAPAN DALAM MANOMETER**

Dari persamaan hidrostatik perubahan ketinggian ( $z_2 - z_1$ ) suatu zat cair setara dengan perubahan tekanan  $(p_2 - p_1)/\rho g$ . Jadi teknik standar untuk mengukur melibatkan penggunaan kolom cairan dalam tabung-tabung tegak atau miring. Peralatan pengukur tekanan yang menggunakan teknik ini disebut *manometer*. Barometer air raksa adalah sebuah contoh manometer, namun masih banyak konfigurasi lain yang mungkin, tergantung pada penerapan tertentu. Tiga jenis manometer yang umum adalah *tabung piezometer*, *manometer tabung U*, dan *manometer tabung miring*.

#### **1. TABUNG PIEZOMETER**

Tabung yang paling sederhana dari manometer terdiri dari sebuah tabung tegak yang terbuka bagian atasnya dan dihubungkan dengan bejana dimana tekanan ingin diketahui, seperti diilustrasikan pada gambar 3.1. Karena manometer melibatkan kolom fluida dalam keadaan diam, persamaan dasar yang menggambarkan penggunaannya adalah persamaan (3-1) yang memberikan tekanan pada suatu ketinggian dalam fluida yang homogen dalam suku-suku tekanan acuan  $p_0$  dan jarak vertikal  $h$  antara  $p$  dan  $p_0$ . Perlu diingat bahwa di dalam fluida diam, *tekanan akan meningkat jika kita bergerak kebawah dan akan berkurang jika kita bergerak ke atas*



Gambar 3.1 : Tabung Piezometer

pengukuran  $h_1$  melalui hubungan

$$p_A = \gamma_1 h_1$$

Perlu dicatat bahwa karena tabung terbuka pada bagian atas, tekanan  $p_0$  dapat ditetapkan sama dengan nol. Karena titik (1) dan titik A di dalam bejana berada pada ketinggian yang sama,  $p_A = p_1$ . Alat ini hanya cocok digunakan sebaliknya akan ada hisapan kedalam sistem, dan tekanan yang akan diukur harus relatif kecil sehingga ketinggian kolom yang dibutuhkan cukup masuk akal.

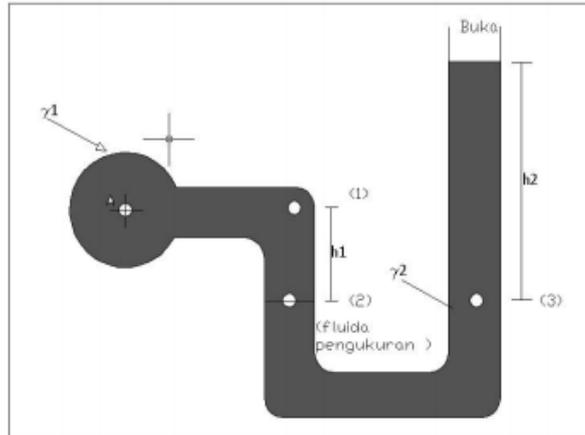
## 2. MANOMETER TABUNG –U

Fluida yang berada dalam manometer disebut *fluida pengukur*. Untuk menentukan tekanan  $p_A$  yang dinyatakan dalam berbagai ketinggian kolom, kita mulai pada sebuah ujung dari sistem dan terus menelusurinya sampai ke ujung yang lainnya sambil menggunakan persamaan (3-2). Jadi, untuk manometer tabung-U yang ditunjukkan pada gambar 3.2, kita akan mulai dari titik A dan menelusurinya sampai keujung terbuka. Tekanan pada titik A dan (1) sama dan dengan kita bergerak dari titik (1) ke (2) tekanan akan meningkat sebesar  $\gamma_1 h_1$ . Tekanan pada titik (2) sama dengan tekanan pada titik (3), karena tekanan pada ketinggian yang sama dalam suatu massa fluida diam yang kontinu pasti sama. Dengan diketahuinya tekanan pada titik (3), sekarang kita dapat berpindah ke ujung terbuka dimana tekanannya adalah nol. Dengan kita bergerak vertikal keatas, tekanan berkurang sebesar  $\gamma_2 h_2$ . Dalam bentuk persamaan berbagai langkah ini dapat dinyatakan sebagai

$$p_A + \gamma_1 h_1 - \gamma_2 h_2 = 0$$

dan oleh karena itu tekanan  $p_A$  dapat dinyatakan dalam ketinggian kolom-kolom sebagai

$$p_A = \gamma_2 h_2 - \gamma_1 h_1 \quad \dots\dots\dots (3-2)$$



Gambar 3.2 : Manometer tabung U sederhana

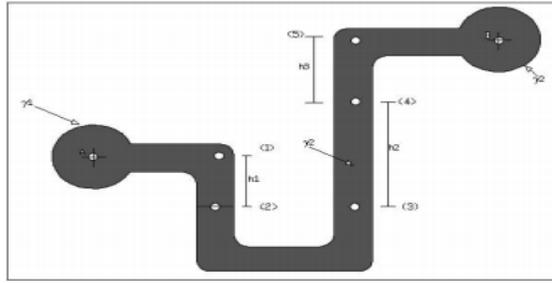
Kelebihan utama Manometer tabung-U didasari kenyataan bahwa fluida pengukur dapat berbeda dari fluida dalam bejana dimana tekanan akan ditentukan. *Kontribusi dari kolom gas di dalam manometer biasanya diabaikan karena berat gas sangat kecil.*

Manometer tabung U juga banyak dipakai untuk mengukur perbedaan tekanan antara dua bejana atau dua titik dalam sebuah sistem. Tinjaulah sebuah manometer yang dihubungkan antara bejana A dan B seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.6. Perbedaan tekanan antara A dan B dapat ditentukan dengan kembali memulai pada satu ujung dari sistem dan menelusurinya sampai keujung yang lain. Sebagai contoh, di A tekanannya adalah  $p_A$ , yang sama dengan  $p_1$  dan dengan kita bergerak ke titik (2) tekanan meningkat sebesar  $\gamma_1 h_1$ , tekanan pada  $p_2$  sama dengan  $p_3$ , dan dengan kita bergerak keatas menuju titik (4) tekanan berkurang sebesar  $\gamma_2 h_2$ . Sama halnya, dengan kita terus bergerak ke atas dari titik (4) ke (5) tekanan berkurang sebesar  $\gamma_3 h_3$ . Akhirnya  $p_5 = p_B$  karena kedua titik berada pada ketinggian yang sama. Jadi;

$$p_A + \gamma_1 h_1 - \gamma_2 h_2 - \gamma_3 h_3 = p_B$$

dan perbedaan tekanan adalah

$$p_A - p_B = \gamma_2 h_2 + \gamma_3 h_3 - \gamma_1 h_1 \quad \dots\dots\dots 3.3$$



Gambar 3.3 : Manometer tabung U differensial

### 3. MANOMETER TABUNG MIRING

Untuk mengukur perubahan tekanan yang kecil, sejenis manometer yang ditunjukkan pada gambar 3.7 sering digunakan. Satu ft manometer dimiringkan pada sudut  $\theta$ , dan bacaan  $l_2$  diukur sepanjang tabung miring. Perbedaan tekanan  $p_A - p_B$  dapat dinyatakan sebagai;

$$p_A + \gamma_1 h_1 - \gamma_2 l_2 \sin \theta - \gamma_3 h_3 = p_B$$

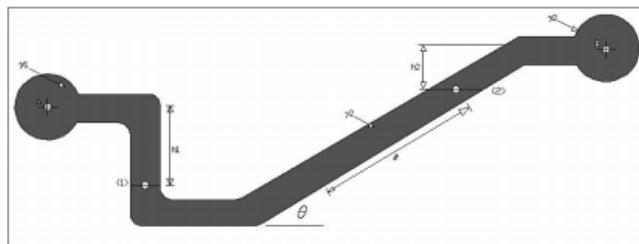
atau

$$p_A - p_B = \gamma_2 l_2 \sin \theta + \gamma_3 h_3 - \gamma_1 h_1$$

Manometer tabung miring sering digunakan untuk mengukur perbedaan perbedaan kecil pada tekanan gas, sehingga pipa-ipipa A dan B berisi gas dan

$$p_B = \gamma_2 l_2 \sin \theta$$

$$l_2 = \frac{p_A - p_B}{\gamma_2 \sin \theta}$$



Gambar 3.4 : Manometer tabung miring

## DAFTAR PUSTAKA

1. Yunus A Cengel and J.M. Cimbala, "Fluid Mechanics: Fundamental and applications", Edisi ke-2, Mc.Graw-Hills, 2014.
2. White, F.M., 1998, Fluid Mechanics, Mcgraw-iHill, New York.

3. U S Departmen of Energy, 1992, Doe Fundamental handbook, Thermodynamics, Heat transfer and Fluid Flow, Volume 3, Washington DC.
4. Ranald V Giles, 1990, Mekanika Fluida dan Hidrolika, Erlangga, Jakarta.
5. Fogiel, M, 1986, The Fluid Mechanics and Dinamics Problem Solver, REA, New York

# **BAB IV**

## **DISTRIBUSI TEKANAN DALAM ALIRAN**

### **FLUIDA**

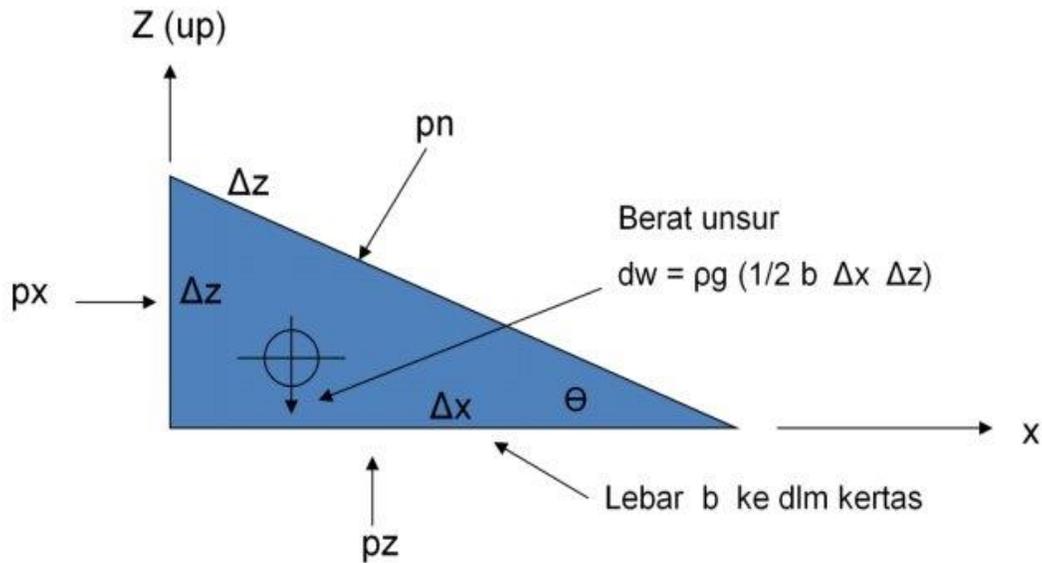
#### **A. PENDAHULUAN**

Materi pembelajaran pada bab ini menguraikan tentang *Distribusi tekanan dalam fluida*. Materi ini menjelaskan *tekanan dan gradien tekanan, distribusi tekanan hidrostatis, gaya hidrostatis pada bidang datar dan lengkung serta pada fluida berlapis, penerapan dalam manometri, apungan dan keseimbangan pada fluida bergerak atau diam dan akibat yang ditimbulkan fluida tersebut pada lingkungannya*. Penguasaan materi ini akan membantu mahasiswa dalam menyelesaikan masalah pada matakuliah lanjutan seperti Hidrolik Pneumatik, sehingga dituntut kemampuan menyelesaikan masalah-masalah Mekanika fluida. Untuk mencapai kemampuan mahasiswa yang efektif/efisien akan dirancang proses pembelajaran yang inovatif bernuansa *learning*.

Sasaran pembelajaran pada bab ini, mahasiswa mampu mengaktualisasikan dengan contoh dan mengukur tekanan. Bentuk pembelajaran dalam bentuk kuliah dibarengi dengan diskusi, serta diberi tugas mandiri di mana sebagai pendahuluan mahasiswa perlu dijelaskan materi pembelajaran tentang distribusi tekanan dalam fluida agar sasaran pembelajaran secara keseluruhan tercapai setelah mempelajari matakuliah ini.

#### **B. MATERI PEMBELAJARAN**

Pada gambar 4.1 dan 4.2 nampak bahwa suatu fluida dalam keadaan diam tidak mampu menahan tegangan geser sehingga lingkaran Mohr tereduksi menjadi titik. Dengan kata lain tegangan normal pada setiap bidang yang melalui unsur fluida yang diam mempunyai nilai unik, yang disebut tekanan fluida  $p$ . Tekanan  $p$  berdasarkan perjanjian nilainya positif jika tegangan normal tersebut menekan. Ini merupakan konsep yang penting, sehingga kita akan meninjaunya lagi dengan pendekatan yang lain.



Gambar 4.1 : Keseimbangan sebuah baji kecil yang diam

Gambar diatas memperlihatkan sebuah baji fluida yang sisinya kecil dalam keadaan diam, yang berukuran  $\Delta x$ ,  $\Delta z$  dan  $\Delta s$ , dan tebalnya  $b$  ke dalam kertas. Menurut defenisi tidak ada geseran, tetapi kita mempostulatkan bahwa tekanan  $p_x$ ,  $p_z$  dan  $p_n$  pada setiap sisi baji dapat berbeda. Berat unsur juga penting. Karena tidak ada percepatan maka penjumlahan gaya pada arah  $x$  dan  $z$  harus menghasilkan nol.

$$\sum F_x = 0 = p_x b \Delta z - p_n b \Delta s \sin \theta$$

$$\sum F_z = 0 = p_z b \Delta x - p_n b \Delta s \cos \theta - \frac{1}{2} \rho g b \Delta x \Delta z$$

Tetapi geometri baji itu sedemikian rupa sehingga;

$$\Delta s \sin \theta = \Delta z \quad \Delta s \cos \theta = \Delta x$$

$$p_x = p_n \quad p_z = p_n + \frac{1}{2} \rho g \Delta z$$

Persamaan ini melukiskan dua azas penting yang berlaku pada kondisi hidrostatik atau tanpa geseran :

1. Tidak ada perubahan tekanan pada arah mendatar

2. Ada perubahan tekanan pada arah vertikal yang sebanding dengan rapat, percepatan gravitasi dan perubahan kedalaman.

Jika unsur fluida berbentuk baji menyusut menjadi suatu "titik"  $\Delta z \rightarrow 0$  dengan tetap menjaga sudut  $\theta$  maka persamaan dibawah menjadi;

$$p_x = p_z = p_n = p$$

Sehingga kita dapat menyimpulkan bahwa *tekanan disebuah titik pada fluida yang diam atau bergerak tidak tergantung pada arahnya sepanjang tidak terdapat tegangan-tegangan geser*. Hasil yang penting ini dikenal sebagai *hukum Pascal*.

## I. DISTRIBUSI TEKANAN HIDROSTATIK

Untuk fluida dalam keadaan diam  $a = 0$  dan  $\nabla^2 V = 0$  sehingga persamaan;

$$\nabla p = \rho(g - a) + \mu \nabla^2 V \quad \text{menjadi: } \nabla p = \rho g$$

atau dalam bentuk komponen ;

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad \frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$$

Persamaan-persamaan ini menunjukkan bahwa tekanan tidak tergantung pada x dan y.

Jadi selagi kita bergerak dari titik ke titik pada bidang datar (setiap bidang yang sejajar dengan bidang x dan y) tekanan tidak berubah. Karena p tergantung hanya pada z sehingga dapat ditulis sebagai persamaan differensial biasa.

$$\frac{dp}{dz} = -\gamma \quad ; \quad \gamma = \rho g \quad ..$$

Atau 
$$p_2 - p_1 = -\int_1^2 \gamma dz$$

Persamaan diatas adalah persamaan dasar untuk fluida diam dan dapat digunakan untuk menentukan bagaimana tekanan berubah menurut ketinggian. Persamaan ini merupakan syarat hidrostatis, yang menunjukkan bahwa gradien tekanan pada arah tegak adalah negatif, artinya tekanan berkurang selagi kita bergerak keatas dalam sebuah fluida diam. Persamaan tersebut berlaku untuk fluida-fluida berat jenis konstan seperti, zat cair maupun fluida-fluida yang berat jenisnya dapat berubah karena ketinggian, seperti udara maupun gas-gas lainnya.

Untuk zat cair atau gas yang diam, gradien tekanan dalam arah tegak pada setiap titik dalam fluida tergantung hanya pada berat jenis dari fluida pada titik tersebut.

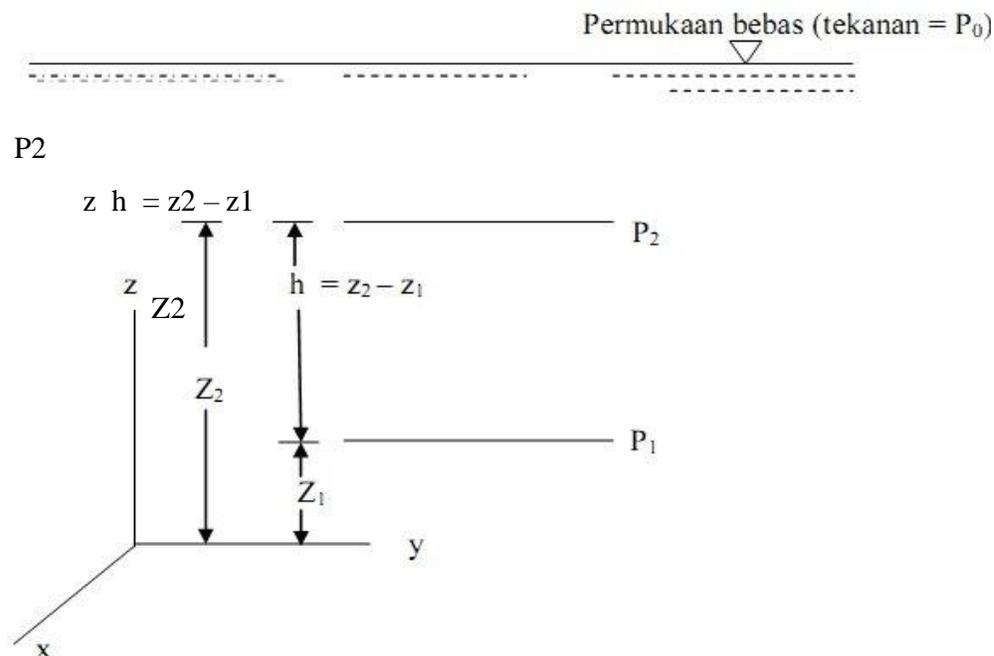
### 1. FLUIDA TAK MAMPU- MAMPAT (INCOMPRESSIBLE FLUID)

Karena berat jenis sama dengan perkalian dari kerapatan fluida dan percepatan gravitasi ( $\gamma = \rho g$ ), maka perubahan pada  $\gamma$  disebabkan oleh perubahan  $\rho$  atau  $g$ . Untuk kebanyakan aplikasi teknik, variasi  $g$  dapat diabaikan, jadi pertimbangan utama kita adalah terhadap variasi kerapatan fluida yang mungkin terjadi. Untuk zat cair variasi kerapatan biasanya diabaikan, bahkan untuk perbedaan jarak vertikal yang besar, sehingga asumsi berat jenis konstan ketika menangani zat cair adalah asumsi yang baik. Untuk itu persamaan (2-6) dapat secara langsung diintegrasikan.

$$\int_{p_1}^{p_2} dp = -\gamma \int_{z_1}^{z_2} dz$$

$$p_2 - p_1 = -\gamma (z_2 - z_1) \text{ Atau } p_1 - p_2 = \gamma (z_2 - z_1)$$

Dimana  $p_1$  dan  $p_2$  adalah tekanan pada ketinggian  $Z_1$  dan  $Z_2$  seperti yang diilustrasikan pada gambar 4.2.



Gambar 4.2 : Notasi untuk variasi tekanan dalam fluida diam dengan permukaan bebas

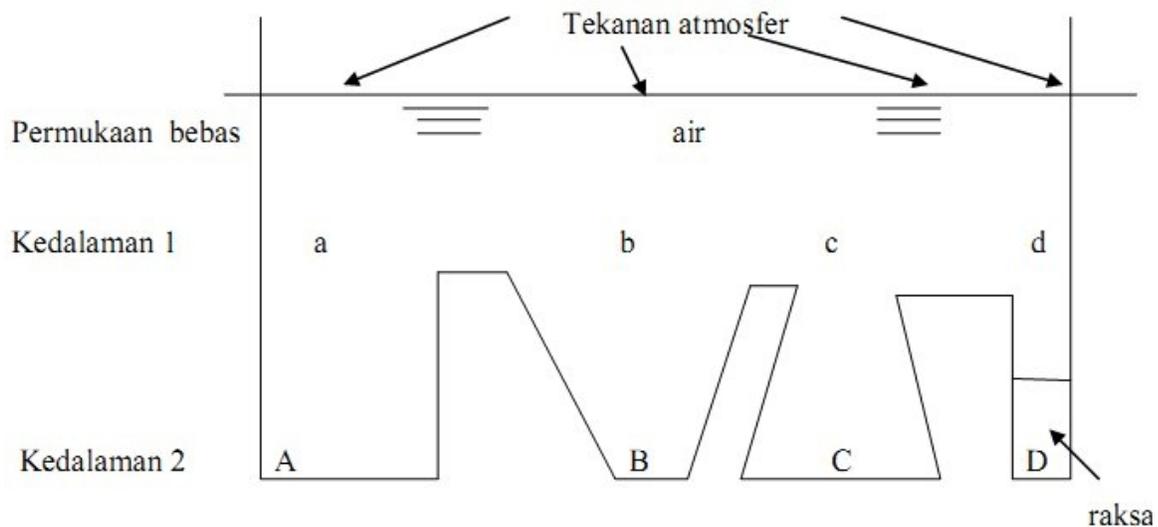
Persamaan dibawah dapat ditulis dalam bentuk yang lebih ringkas;

$$p_1 - p_2 = \gamma h \quad \text{atau} \quad p_1 = \gamma h + p_2$$

Dimana  $h$  adalah jarak  $Z_1$  dan  $Z_2$ , yang merupakan kedalaman fluida yang diukur kebawah dari lokasi  $p_2$ . Jenis distribusi tekanan ini disebut distribusi *hidrostatik*. Persamaan  $h$  menunjukkan bahwa dalam fluida tak mampu mampat (*incompressible*) yang diam, tekanan berubah secara linier terhadap kedalaman. Tekanan pasti meningkat untuk menyangga fluida diatasnya. Dapat diamati pula dari persamaan dibawah bahwa perbedaan tekanan antara dua titik dapat ditentukan dengan jarak  $h$  karena;

$$h = \frac{p_1 - p_2}{\gamma}$$

Dalam hal ini  $h$  disebut *head tekanan* yang diinterpretasikan sebagai *ketinggian kolom fluida yang akan memberikan perbedaan tekanan yang ditentukan*.



Gambar 4.3 : Distribusi tekanan hidrostatik dalam sebuah bejana dengan bentuk sembarang.

Ketika seorang bekerja menggunakan zat cair sering terdapat permukaan bebas, seperti yang diilustrasikan pada gambar 4.2 dan akan memudahkan jika menggunakan permukaan ini sebagai bidang acuan. Tekanan acuan  $p_0$  akan bersesuaian dengan tekanan Yang bekerja pada permukaan bebas (yang seringkali berupa tekanan atmosfer). Jika

persamaan diatas kita jadikan  $p_2 = p_0$  maka tekanan  $p$  pada suatu kedalaman  $h$  dibawah permukaan bebas diberikan oleh persamaan:

$$p = \gamma h + p_0$$

Seperti yang ditunjukkan oleh persamaan diatas, *tekanan dalam fluida diam yang homogen, tak mampu mampat tergantung pada kedalaman fluida relatif terhadap suatu bidang acuan, dan tidak dipengaruhi oleh ukuran atau bentuk dari tangki dimana fluida ditampung.*

## 2. FLUIDA MAMPU-MAMPAT (COMPRESSIBLE FLUID)

Kita biasanya menganggap gas-gas seperti udara, oksigen dan nitrogen sebagai fluida mampu mampat (*compressible fluid*), karena kerapatan gas dapat berubah secara berarti dengan perubahan-perubahan tekanan dan temperatur. Karena berat jenis gas-gas sangat kecil, maka dari persamaan (3-6) didapatkan bahwa gradien tekanan pada arah vertikal juga kecil, dan bahkan untuk jarak beberapa ratus ft, tekanan pada dasarnya tetap konstan untuk sebuah gas.

Untuk situasi dimana variasi ketinggian cukup besar dalam orde ribuan ft, perlu diperhatikan variasi berat jenis. Seperti pada Bab II, persamaan keadaan dari suatu gas ideal (gas sempurna) adalah:

$$p = \rho RT$$

Hubungan ini dapat dikombinasikan dengan persamaan dibawah menjadi

$$\frac{dp}{dz} = \frac{gp}{RT}$$

Dan dengan memisahkan variabel diperoleh

$$\int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p} = \ln \frac{p_2}{p_1} = -\frac{g}{R} \int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{T}$$

Dimana  $g$  dan  $R$  diasumsikan konstan sepanjang perubahan ketinggian dari  $z_1$  sampai  $z_2$ . Meskipun percepatan gravitasi  $g$  memang berubah menurut ketinggian, perubahannya sangat kecil (lihat tabel C1 dan C2 pada lampiran).

Sebelum menyelesaikan pengintegralan, kita harus menentukan dulu sifat variasi temperatur terhadap ketinggian. Misalnya jika kita asumsikan bahwa temperatur memiliki nilai konstan  $T_0$  sepanjang kisaran  $z_1$  dan  $z_2$  (kondisi isothermal) maka dari persamaan diatas diperoleh

$$p_2 = p_1 \exp \left[ \frac{g(z_2 - z_1)}{RT_0} \right]$$

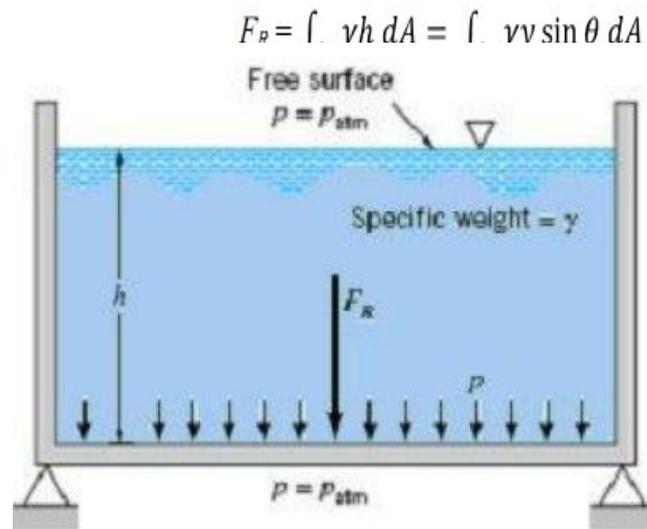
Persamaan ini memberikan hubungan tekanan-ketinggian yang diinginkan oleh sebuah lapisan isothermal. Untuk kondisi yang tidak isothermal, prosedur yang serupa dapat diikuti jika hubungan temperatur-ketinggian diketahui.

*Jika berat jenis sebuah fluida berubah cukup besar ketika kita bergerak dari titik ke titik, maka tekanan tidak lagi berubah secara langsung terhadap kedalaman.*

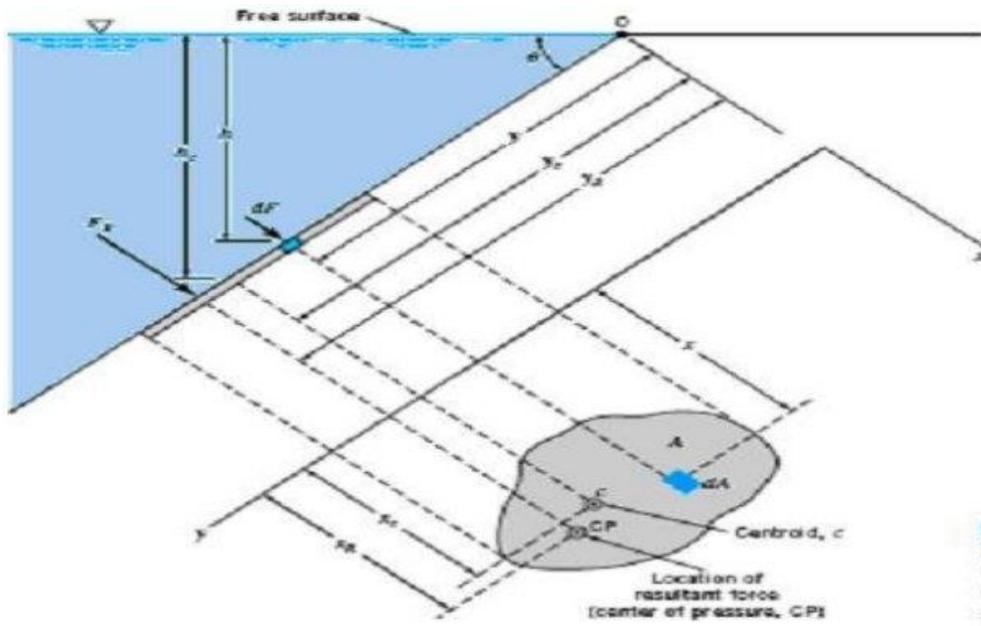
### 3. GAYA HIDROSTATIK PADA SEBUAH BIDANG

Ketika sebuah permukaan tenggelam dalam sebuah fluida, gaya – gaya akan bekerja pada permukaan fluida tersebut. Penentuan gaya – gaya adalah hal yang sangat penting dalam perencanaan tangki – tangki penyimpanan, kapal laut, bendungan dan struktur – struktur hidrolik lainnya. Pada fluida diam telah kita ketahui bahwa gaya – gaya yang tersebut pasti tegak lurus terhadap permukaan karena tidak adanya tegangan – tegangan geser. Kita juga tahu bahwa tekanan akan berubah secara linier menurut kedalaman jika fluidanya tak mampu mampat. Pada sebuah permukaan datar, seperti dasar dari sebuah tangki yang terisi suatu cairan ( gambar 4.4 ), besarnya gaya resultan adalah  $F_R = pA$ , dimana  $p$  adalah tekanan seragam pada permukaan dasar dan  $A$  adalah luas dasar tangki, untuk tangki terbuka seperti yang ditunjukkan,  $p = \gamma h$ . Perlu diperhatikan bahwa bila tekanan atmosfer bekerja pada kedua belah sisi permukaan dasar tangki, seperti yang diilustrasikan, maka gaya resultan pada dasar tersebut hanya disebabkan oleh cairan didalam tangki. Karena tekanan konstan dan terdistribusi seragam diseluruh permukaan dasar, maka gaya resultan tersebut bekerja melalui pusat massa ( *centroid* ) dari bidang permukaan tersebut seperti yang ditunjukkan Gambar 4.4.

Untuk kasus yang lebih umum dimana permukaan datar yang tenggelam dalam keadaan miring, seperti yang dilustrasikan pada Gambar 4.5, penentuan gaya resultan yang bekerja pada permukaan lebih sedikit rumit. Untuk sementara ini kita akan mengasumsikan bahwa permukaan fluida terpapar ke atmosfer. Misalkan bahwa bidang datar yang memuat permukaan tersebut berpotongan dengan permukaan bebas pada 0 dan membuat sudut  $\theta$  dengan permukaan ini seperti pada Gambar 4.5. Sistem koordinasi x-y didefinisikan sedemikian hingga O adalah titik asal dan y diarahkan sepanjang permukaan seperti yang ditunjukkan. Kita ingin menentukan arah, tempat dan besarnya gaya resultan yang bekerja pada satu sisi permukaan ini karena cairan yang bersentuhan dengan luasan permukaan tersebut. Pada suatu kedalaman h gaya yang bekerja pada luas  $dA$  (luas differensial dari Gambar 4.5) adalah  $dF = \gamma h dA$  dan tegak lurus terhadap permukaan. Jadi besarnya gaya resultan dapat ditentukan dengan mdenjumlahkan gaya – gaya differensial ini, yang meliputi seluruh permukaan bidang. Dalam bentuk persamaan :



Gambar 4.4 : Tekanan dan gaya hidrostatis resultan yang timbul pada permukaan dasar sebuah tangki terbuka.



Gambar 4.5 : Notasi untuk gaya hidrostatik pada permukaan bidang miring berbentuk sembarang.

Dimana  $h = y$  Untuk  $\gamma$  dan  $\theta$  yang konstan

$$F_R = \gamma \sin \theta \int_A y dA$$

Integral yang terdapat pada persamaan diatas adalah momen pertama dari luas bidang terhadap sumbu  $x$ , jadi kita dapat menuliskan

$$\int_A y dA = y_c A$$

Dimana  $y_c$  adalah koordinasi  $-y$  dari pusat massa yang diukur dari sumbu  $-x$  yang melalui 0. Jadi, persamaan diatas dapat ditulis sebagai

$$F_R = \gamma A y_c \sin \theta$$

Atau lebih sederhananya sebagai

$$F_R = \gamma h_c A$$

Dimana  $h_c$  adalah jarak vertikal dari permukaan fluida ke pusat massa bidang. Perlu diperhatikan bahwa besarnya gaya tidak tergantung pada sudut  $\theta$  dan tergantung hanya pada berat jenis fluida. Luas total bidang dan kedalaman dari pusat massa bidang dibawah permukaan fluida. Akibatnya, persamaan diatas mengindikasikan bahwa besarnya gaya resultan sama dengan tekanan pada pusat massa bidang dikalikan dengan luas total bidang. Karena seluruh gaya diferensial yang dijumlahkan untuk mendapatkan  $F_R$  tegak lurus terhadap permukaan bidang, maka gaya resultan  $F_R$  pasti juga tegak lurus terhadap permukaan tersebut.

Walaupun intuisi kita mungkin mengatakan bahwa gaya resultan seharusnya melewati pusat massa bidang, hal sesungguhnya tidak demikian. Koordinat  $y, y_R$  dari gaya resultan dapat ditentukan dengan penjumlahan momen terhadap sumbu  $-x$ . Artinya, momen dari gaya resultan harus sama dengan momen dari gaya tekan yang terdistribusi, atau

$$F_R y_R = \int_A y dF = \int_A \gamma \sin \theta y^2 dA$$

Dan oleh karena itu, karena  $F_R = \gamma A y_c \sin \theta$

$$y_R = \frac{\int_A y^2 dA}{y_c A}$$

integral dalam pembilang disebut *momen kedua dari luas bidang* ( *momen inersia* ),  $I_x'$  terhadap sumbu  $-x$  yang terbentuk oleh perpotongan bidang yang memuat permukaan dengan permukaan bebas ( sumbu  $-x$  ). Jadi kita dapat menuliskan

$$y_R = \frac{I_x}{y_c A}$$

sekarang kita dapat menggunakan teorema sumbu sejajar untuk menyatakan  $I_x$  sebagai

$$I_x = I_{xc} + Ay_c^2$$

Dimana  $I_{xc}$  adalah momen kedua dari luas bidang terhadap sebuah sumbu yang melewati pusat massanya dan sejajar dengan sumbu  $-x$ . jadi

$$y_R = \frac{I_{xc}}{y_c A} + y_c$$

persamaan 3.19 menunjukkan dengan jelas bahwa gaya resultan tidak melewati pusat massa namun selalu di bawahnya, karena  $I_{xc}/y_c A > 0$ .

Koordinat  $x, x_R'$  dari gaya resultan dapat ditentukan melalui cara yang sama dengan menjumlahkan momen terhadap sumbu-iy. jadi

$$F_R x_R = \int_A \gamma \sin \theta xy dA$$

Dan oleh karena itu

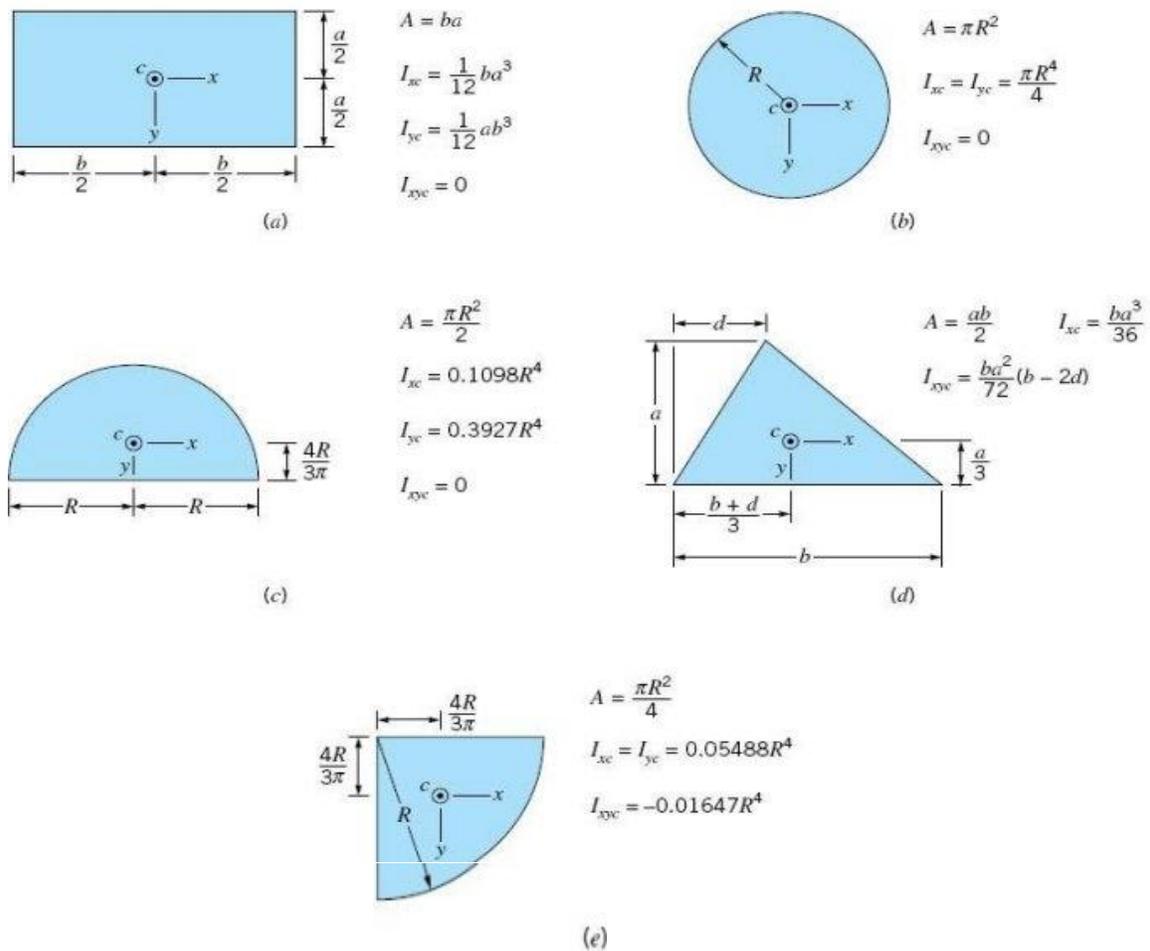
$$x_R = \frac{\int_A xy dA}{y_c A} = \frac{I_{xy}}{y_c A}$$

dimana  $I_{xy}$  adalah produk inersia terhadap sumbu  $-$  sumbu  $x$  dan  $y$ . kembali lagi dengan menggunakan teorema sumbu sejajar<sup>1</sup> kita dapat menuliskan

$$x_R = \frac{I_{xyc}}{y_c A} + x_c$$

Dimana  $I_{xyc}$  adalah produk inersia terhadap sebuah sistem koordinat ortogonal yang melewati pusat massa dari bidang dan dibentuk dengan suatu translasi sistem koordinat  $x -$

y. Jika bidang yang tenggelam simetris terhadap sebuah sumbu yang melewati pusat massa dan sejajar terhadap salah satu sumbu x atau y, maka gaya resultan pasti terletak sepanjang garis  $-x = x_c$ , karena dalam hal ini  $I_{xyc}$  sama dengan nol. Titik yang dilewati oleh gaya resultan yang bekerja disebut sebagai pusat tekanan. Perlu diperhatikan dari persamaan 3-19 dan 3-20 yaitu jika  $y_c$  meningkat maka *pusat tekanan* akan berpindah mendekati pusat massa karena  $y_c = h_c / \sin \theta$ , jarak  $y_c$  akan meningkat jika kedalaman tenggelam  $h_c$ , meningkat atau untuk suatu kedalaman, bidangnya diputar sedemikian hingga sudut  $\theta$  berkurang. Koordinat – koordinat pusat massa dan momen inersia dari beberapa bidang yang umum ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 4.6 :Sifat-sifat geometric dari beberapa bentuk yang umum.

#### IV. TEKANAN HIDROSTATIK PADA PERMUKAAN LENGKUNG

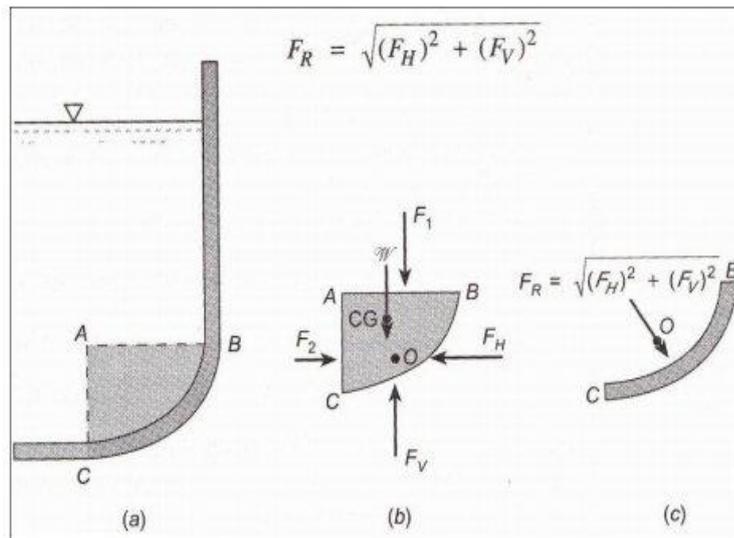
Persamaan – persamaan yang dikembangkan di subbab III untuk besar dan letak gaya resultan yang bekerja pada permukaan terendam hanya berlaku untuk permukaan bidang datar. Namun banyak permukaan yang dikaji ( seperti yang berkaitan dengan dam, pipa, dan tangki ) bukanlah bidang datar. Sebagai pendekatan alternatif, kita akan mempertimbangkan kesetimbangan volume fluida yang diselubungi oleh permukaan lengkung yang ditinjau dan proyeksi horizontal dan vertikal dari permukaan ini.

Sebagai contoh, perhatikan bagian lengkung  $BC$  dari tangki terbuka yang ditunjukkan gambar 4.7a. kita ingin mengetahui gaya fluida resultan pada bagian ini, yang mempunyai panjang satuan tegak lurus terhadap bidang kertas. Pertama kita mengisolasi suatu volume fluida yang dibatasi oleh permukaan yang ditinjau dalam hal ini bagian  $BC$ , permukaan bidang datar horizontal  $AB$ , dan permukaan bidang datar vertikal  $AC$ . Diagram benda bebas dari volume ini seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.7b. Besar dan letak dari gaya  $F_1$  dan  $F_2$  dapat ditentukan dari hubungan – hubungan pada permukaan datar. Berat,  $W$ , dengan mudah ditentukan dari berat jenis fluida dikalikan dengan volume yang dibatasi tersebut dan bekerja melewati pusat grafitasi (  $CG$  ) dari massa fluida yang terdapat dalam volume itu. Gaya – gaya  $F_h$  dan  $F_v$  mewakili komponen –komponen  *gaya yang diberikan oleh tangki kepada fluida.*

Supaya sistem gaya ini berada dalam keadaan setimbang, komponen horisontal  $F_h$  harus sama besar dan segaris dengan  $F_2$ , dan komponen vertikal,  $F_v$  sama besarnya dan segaris dengan resultan gaya – gaya vertikal  $F_1$  dan  $W$ . Hal tersebut disebabkan karena tiga buah gaya yang bekerja pada massa fluida ( $F_2$ , resultan dari  $F_1$  dan  $W$ , dan gaya resultan yang diberikan tangki kepada massa) harus membentuk sebuah sistem gaya yang bersamaan ( *concurrent* ). Artinya, dari prinsip – prinsip statika, dimengerti bahwa jika sebuah benda berada dalam keadaan keseimbangan oleh tiga gaya yang tidak sejajar, maka garis – garis kerja gaya tersebut harus berpotongan pada sebuah titik yang sama ( *concurrent* ) dan sebidang. Jadi :

Gaya resultan  $F_R$  melewati titik 0 yang dapat ditentukan letaknya dengan menjumlahkan momen terhadap sebuah sumbu yang tepat. Gaya resultan dari fluida yang bekerja pada

permukaan lengkung  $BC$  sama dengan dan berlawanan arah dengan gaya yang diperbolehkan dari diagram benda bebas pada Gambar 4.7  $b$ . Gaya fluida yang dicari ditunjukkan pada Gambar 4.7  $c$ .



Gambar 4.7 : Gaya hidrostatis pada sebuah permukaan lengkung

## DAFTAR PUSTAKA

1. Yunus A Cengel and J.M. Cimbala, "Fluid Mechanics: Fundamental and applications", Edisi ke-2, Mc.Graw-Hills, 2014.
2. White, F.M., 1998, Fluid Mechanics, Mcgraw-iHill, New York
3. U S Departmen of Energy, 1992, Doe Fundamental handbook, Thermodynamics, Heat transfer and Fluid Flow, Volume 3, Washington DC
4. Ranald V Giles, 1990, Mekanika Fluida dan Hidrolika, Erlangga, Jakarta
5. Fogiel, M, 1986, The Fluid Mechanics and Dinamics Problem Solver, REA, New York

# BAB V

## MENGAPUNG DAN KESTABILAN

### 1. PRINSIP ARCHIMEDES

Jika sebuah benda diam terendam seluruhnya di dalam sebuah fluida atau mengapung sedemikian sehingga hanya sebagian saja yang terendam, gaya fluida resultan yang bekerja pada sebuah benda tersebut dinamakan *Gaya Apung (buoyancy force)*. Sebuah gaya neon ke arah atas terjadi karena tekanan meningkat dengan kedalaman dan gaya-gaya tekan yang bekerja dari bawah lebih besar daripada gaya-gaya yang bekerja dari atas. Gaya ini dapat ditentukan dengan pendekatan yang sama seperti yang digunakan pada bagian sebelumnya mengenai gaya-gaya pada permukaan lengkung. Tinjaulah sebuah benda berbentuk sembarang yang memiliki volume, yang terendam dalam sebuah fluida seperti yang diilustrasikan pada Gambar 5.1a. Kita menyelubungi benda tersebut dalam sebuah kotak tersebut dengan benda telah dipisahkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.1b. Perhatikan bahwa gaya  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ , dan  $F_4$  adalah gaya-gaya yang bekerja pada permukaan-permukaan bidang dari kotak (untuk kemudahan, gaya-gaya pada arah  $-x$  tidak diperlihatkan),  $W$  adalah berat dari volume fluida yang diarsir (kotak dikurangi benda) dan  $F_B$  adalah gaya yang diberikan oleh benda *pada fluida*. Gaya-gaya pada permukaan vertikal, seperti  $F_3$  dan  $F_4$  sama besar dan saling menghilangkan jadi persamaan kesetimbangan yang ditinjau adalah dalam arah  $-z$  dan dapat dinyatakan sebagai:

$$F_B = F_2 - F_1 - W$$

Jika berat jenis dari fluida konstan maka :

$$F_2 - F_1 = \gamma(h_2 - h_1)A$$

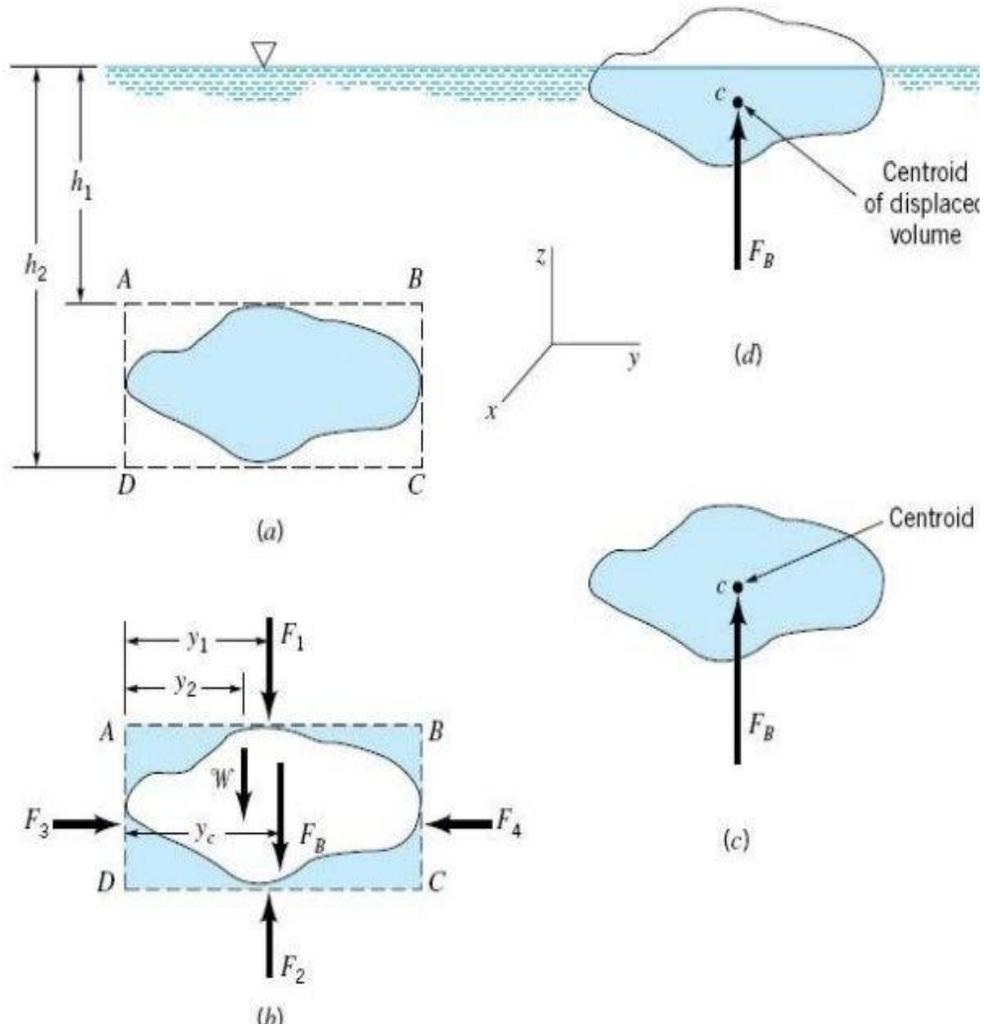
Dimana  $A$  adalah luas bidang horizontal dari permukaan atas(atau bawah) kotak dan persamaan diatas dapat ditulis sebagai

$$F_B = \gamma(h_2 - h_1)A - \gamma((h_2 - h_1)A - V)$$

Dengan menyederhanakan persamaan diatas, kita mendapatkan persamaan untuk gaya apung:

$$F_B = \gamma V$$

Dimana  $\gamma$  adalah berat jenis dari fluida dan  $V$  adalah volume benda. Arah dari gaya apung yang merupakan gaya dari fluida terhadap benda berlawanan arah dengan gaya yang ditunjukkan dalam diagram benda bebas. Oleh karena itu, gaya apung mempunyai besar yang sama dengan berat fluida yang dipindahkan oleh benda tersebut dan mengarah vertical ke atas. Hasil ini sering disebut sebagai prinsip Archimedes untuk menghormati **Archimedes** (287-212 SM) seorang ahli mekanik.



Gambar 5.1 : Gaya apung pada benda-benda yang terendam dan mengapung.

dan matematika Yunani yang pertama kali mengemukakan gagasan-gagasan dasar yang berkaitan dengan hidrostatis.

Letak garis kerja dari gaya apung dapat ditentukan dengan menjumlahkan momen gaya-gaya yang ditunjukkan pada diagram benda bebas pada gambar 5.1b terhadap suatu sumbu yang memudahkan. Misalnya dengan menjumlahkan momen terhadap sebuah sumbu tegak lurus terhadap permukaan kertas yang melalui titik D akan kita dapatkan

$$F_{Byc} = F_2y_1 - F_1y_1 - Wy_2$$

Dan dengan mensubstitusi berbagai gaya diperoleh

$$v y_c = v_T y_1 - (v_T - v) y_2 .$$

dimana  $v_T$  adalah volume total  $(h_2 - h_1)A$ . Ruas kanan persamaan diatas adalah momen pertama dari volume yang dipindahkan terhadap bidang x-z sehingga  $Y_C$  sama dengan koordinat y dari pusat massa volume v. Dengan cara yang sama dapat ditunjukkan bahwa koordinat x dari gaya apung bertepatan dengan koordinat x dari pusat massa tersebut. Jadi kita simpulkan bahwa *gaya apung melewati pusat massa dari volume yang dipindahkan* seperti yang ditunjukkan pada gambar 5.1.c. Titik yang dilalui oleh gaya apung yang bekerja disebut pusat apung (*center of buoyancy*).

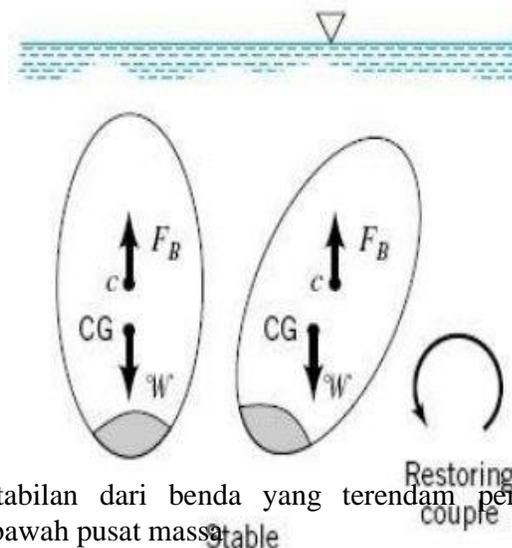
Hasil yang sama juga berlaku pada benda-benda yang terapung dimana hanya sebagian saja yang terendam, seperti diilustrasikan pada Gambar 5.1.d, jika berat jenis fluida diatas permukaan cairan sangat kecil dibandingkan dengan berat cairan dimana benda tersebut mengapung. Karena fluida diatas permukaan biasanya udara, untuk keperluan-keperluan praktis kondisi ini terpenuhi.

Dalam penurunan-penurunan perhitungan diatas, fluida diasumsikan memiliki berat jenis yang konstan,  $\gamma$ . *Jika sebuah benda terendam dalam fluida dimana  $\gamma$  bervariasi menurut kedalaman seperti pada fluida yang berlapis besarnya gaya apung tetap sama dengan berat dari fluida yang dipindahkan. Namun demikian, gaya apung tersebut tidak melewati pusat massa tetapi akan melewati pusat gravitasi dari volume yang dipindahkan tersebut.*

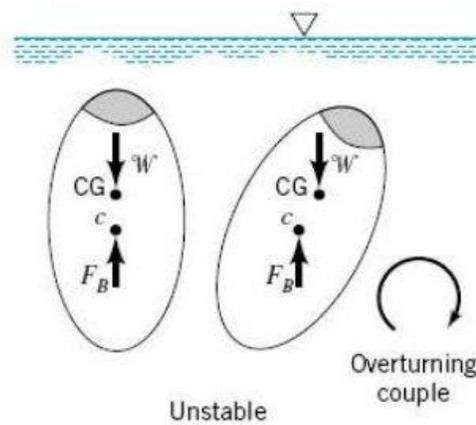
### 3. KESTABILAN

Satu masalah lain yang menarik dan penting berkaitan dengan benda-benda yang terendam atau terapung adalah kestabilan benda-benda tersebut. Sebuah benda dikatakan berada dalam suatu posisi *kesetimbangan yang stabil* jika benda tersebut kembali ke posisi kesetimbangannya ketika diusik. Sebaliknya, benda berada dalam keadaan *kesetimbangan yang tidak stabil* jika ketika diusik (meskipun sedikit), benda tersebut bergerak menuju posisi kesetimbangan baru. Pertimbangan kestabilan sangat penting khususnya bagi benda-benda yang terendam atau terapung karena pusat apung dan pusat gravitasi tidak selalu bertepatan. Sebuah rotasi kecil dapat menghasilkan kopel yang mungkin mengembalikan posisi atau yang menggulingkannya. Misalnya untuk benda yang terendam penuh seperti

ditunjukkan gambar 5.2 yang mempunyai pusat gravitasi di bawah pusat apung, suatu rotasi dari posisi kesetimbangannya akan menghasilkan sebuah kopel pemulih yang dibentuk oleh berat  $W$  dan gaya apung  $F_B$  yang akan menyebabkan benda berotasi kembali ke posisi asalnya. Jadi untuk konfigurasi ini benda tersebut stabil. Perlu dicatat bahwa selama pusat gravitasi berada di bawah pusat apung, kondisi ini selalu berlaku artinya benda berada dalam posisi kesetimbangan stabil terhadap rotasi-rotasi kecil. Namun sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 5.2 jika pusat gravitasi berada



Gambar 5.2 : Kestabilan dari benda yang terendam penuh pusat gravitasi dibawah pusat massa

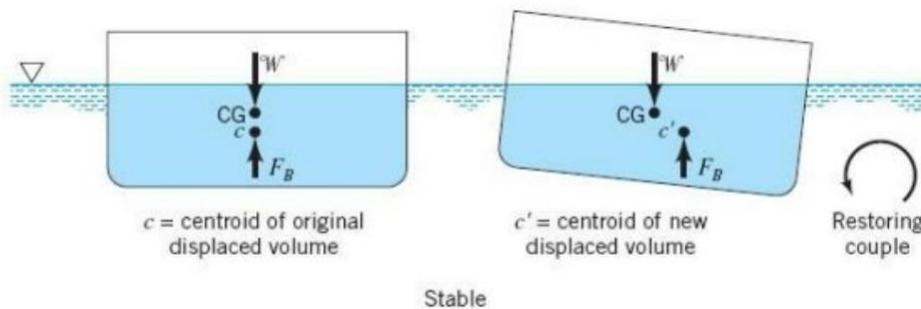


Gambar 5.3 : Kestabilan dari benda yang terendam penuh pusat gravitasi diatas pusat massa

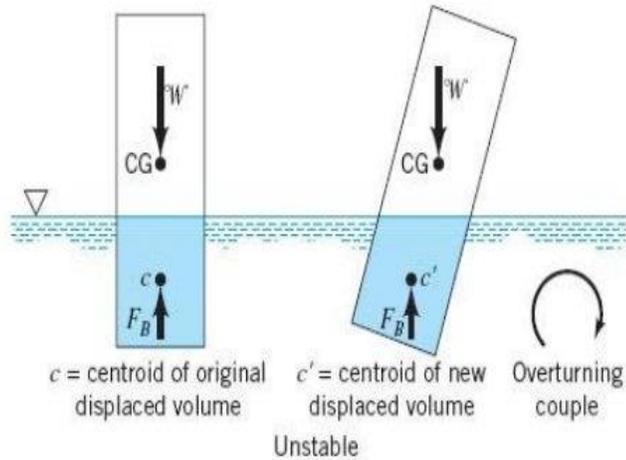
di atas pusat apung, kopel yang terbentuk dari berat dan gaya apung akan menyebabkan benda terguling dan menuju sebuah kesetimbangan baru. *Jadi sebuah benda yang terendam penuh dengan pusat gravitasi di atas pusat apungnya berada dalam posisi kesetimbangan tidak stabil.*

Untuk benda yang terapung, masalah kestabilan lebih rumit, karena jika benda berotasi, lokasi dari pusat apungnya (yang melewati pusat massa dari volume yang dipindahkannya), bisa berubah. Seperti ditunjukkan oleh gambar 5.3 sebuah benda yang terapung seperti perahu tongkang yang meluncur perlahan di air dapat stabil meskipun pusat gravitasinya berada di atas pusat apungnya. Hal ini dapat terjadi karena ketika benda berputar, gaya apung  $F_B$  bergeser melewati pusat massa dari volume yang terdesak yang baru terbentuk dan seperti yang diilustrasikan pada gambar, gaya apung ini berkombinasi dengan berat  $W$  membentuk sebuah kopel yang akan menyebabkan benda tersebut kembali ke posisi kesetimbangan semula. Namun untuk benda yang relative tinggi dan kurus seperti yang ditunjukkan pada gambar 5.4, sebuah rotasi yang kecil dapat menyebabkan gaya apung dan berat untuk membentuk kopel yang membuat benda terguling seperti yang diilustrasikan.

Jelas dari contoh-contoh yang sederhana ini bahwa penentuan kestabilan dari benda-benda yang terendam atau terapung dapat menjadi sulit karena analisisnya tergantung pada kerumitan bentuk dari geometri tertentu dan distribusi berat dari benda tersebut. Masalah tersebut akan lebih sulit lagi dengan adanya tambahan jenis gaya-gaya yang ditimbulkan oleh hembusan angin atau arus laut. *Pertimbangan kestabilan jelas sangat penting dalam perancangan kapal laut, kapal selam, bathyscaphes dan seterusnya dan pertimbangan tersebut memegang peranan penting dalam pekerjaan arsitek Alat Berat.*



Gambar 5.4: Kestabilan dari benda yang terapung-konfigurasi stabil

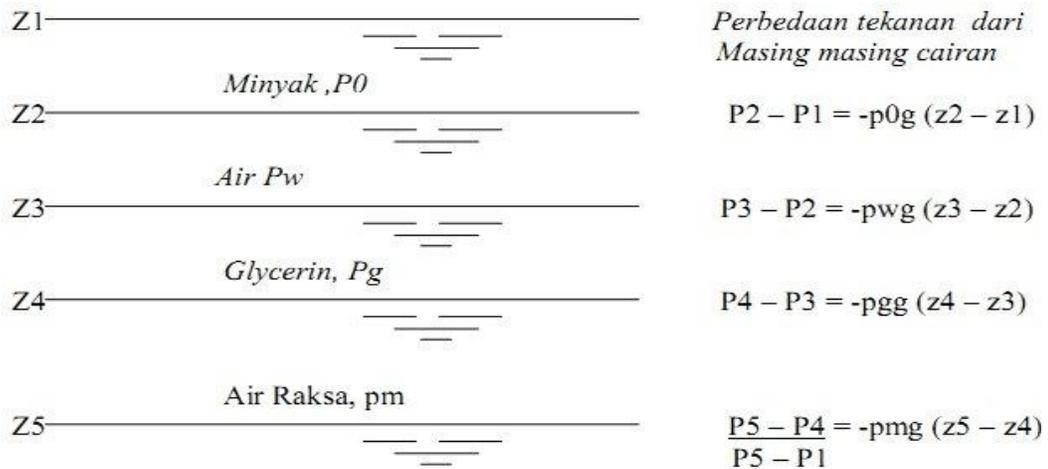


Gambar 5.5 : Kestabilan dari benda yang terapung-konfigurasi tidak stabil

**CONTOH SOAL:**

5.1. Hitung perbedaan tekanan dari kolom-kolom cairan di bawah ini.

*Tekanan Yang diketahui P1*



**Penyelesaian :**

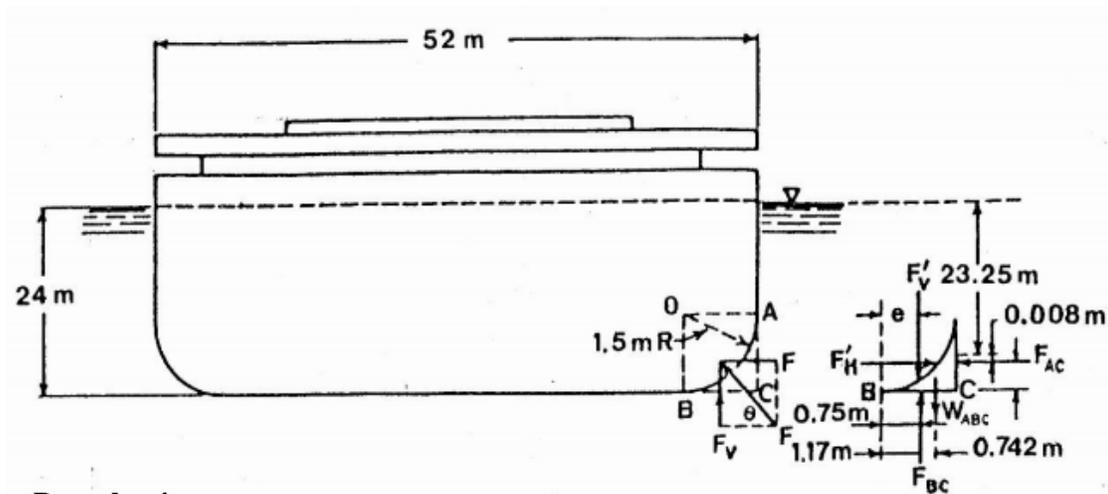
Persamaan Dasar hidrostatik

$$p_5 - p_1 = -\rho_0 g(z_2 - z_1) - \rho_w g(z_3 - z_2) - \rho_G g(z_4 - z_3) - \rho_M g(z_5 - z_4)$$

Tidak ada tambahan penyederhanaan yang mungkin dilakukan pada sisi kanan karena perbedaan kerapatan. Mengingat bahwa kita telah menempatkan cairan tepat dari

bagian atas yang paling terang sampai bagian bawah yang berat. Ini hanya konfigurasi stabil jika kita mencoba melapisinya dengan cara lain cairan akan membalik dan berusaha mengatur kestabilan.

- 5.2. Perhitungkanlah bagian silang yang diperlihatkan dibawah lambung dari sebuah tangki minyak seberat 330,000 ton. Hitung magnituda, arah dan lokasi dari arah gaya resultan per meter yang diberikan oleh air laut ( $\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$ ) pada permukaan lengkung AB (yang berbentuk  $\frac{1}{4}$  lingkaran) pada sudut lambung.



**Penyelesaian :**

Pisahkanlah badan kapal yang bebas dari air ABC.

Komponen horisontal: Dengan melakukan inspeksi , gaya ini memiliki arah tekan ke kanan:

$$F'_H = F_{AC} = 1.5 \times 10^4 \times 23.25 = 348.8 \frac{kN}{m}$$

$$(l_p - l_c)AC = \frac{l_c}{l_c A} = \frac{0.28}{23.25 \times 1.5} = 0.008 \text{ m}$$

Pada vertikal komponen: dengan melakukan inspeksi, gaya ini (pada badan bebas) memiliki arah tekan ke bawah:

$$\sum F_z = 24 \times 10^4 \times 1.5 - F'_V - 10^4 \times 2.25 - \frac{2.25\pi}{4} = 0;$$

$$F'_V = 355.2 \text{ kN/m}$$

Dari pusat grafitasi statik ABC yang diketahui bernilai 1.17 m ke kanan dari titik b, dan mengambil momentum dari gaya pada bodi bebas bernilai nol,

$$355.5 \times e + 4.8 \times 1.17 - 360 \times 0.75 = 0;$$

$$e = 0.74 \text{ m}$$

Resultan gaya air pada AB:

Arah: mengarah ke atas samping kiri,  $\theta = \arctan 355.2/348.8$

$$= 45.5^\circ$$

Magnitude :

$$F = \sqrt{(348.8)^2 + (355.2)^2} = 497.8 \text{ kN/m}$$

Lokasi : melalui titik 0.742 m di atas dan 0.74 m ke kanan B. Dikarenakan oleh gaya tekanan pada elemen dari silinder , walaupun semua perbedaan magnitude, sama melewati 0, dan dari semua itu membentuk  $(1.5-0.742)/0.74 = 355.2/348.8$ , perkiraan ini ternyata benar ingatlah

- 5.3. Berapa persen total volume dari sebuah bongkahan es yang mengapung diatas permukaan air ? asumsikanlah bahwa kepadatan dari es bernilai  $57.2 \text{ lbm/ft}^3$  , kerapatan air  $62.4 \text{ lbm/ft}^3$

**Penyelesaian:**

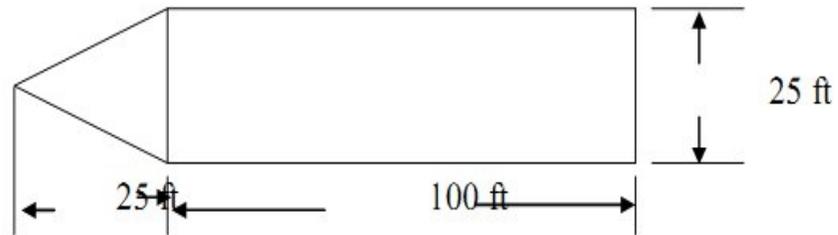
pada tingkat seimbang, massa dari bongkahan es berada dalam kondisi seimbang pada gaya apung terhadap air

$$\rho_{es} V_{bongkahan \text{ es}} = \rho_{air} V_{timbul}$$

$$\frac{V_{timbul}}{V_{bongkahan \text{ es}}} = \frac{57.2}{62.4} = 0.92$$

Oleh karena itu hanya 8% dari bongkahan es yang berada di atas permukaan.

- 5.4. Untuk sebuah kapal dengan bagian persilangan garis air seperti yang ditunjukkan pada gambar satu dengan posisi massa 600 ton yang salah, tentukanlah jarak GB maksimum dari pusat gravitasi kemungkinan terdapat diatas pusat gaya apung jika menginginkan kapal tetap stabil



**Penyelesaian:**

dengan gambar 2 dan 3 sebagai referensi muncullah keterhubungan sebagai berikut:

$$MG = \frac{\dot{I}}{V} - GB$$

Dimana I adalah momen inersia dari area A terhadap longitudinal axis 0.

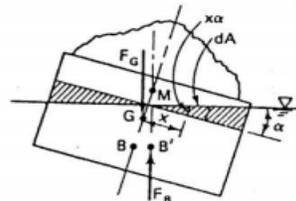


Fig. 2

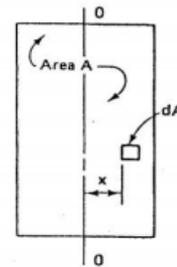


Fig. 3

Jelas, semakin jauh jarak MG nya, semakin besar stabilitasnya. Karena badan kapal yang mengapung menjadi tidak stabil jika M berada dibawah G maka Eq. 1 menjadi sebuah indikator langsung dari kondisi ini. Lebih jelasnya,

$$\frac{\dot{I}}{V} > GB \quad \text{badan stabil}$$

$$\frac{\dot{I}}{V} < GB \quad \text{badan tidak stabil}$$

Pada titik ketidakstabilan,  $GB = \dot{I}/V$ , dimana

$$\dot{I} = \frac{(100)(25)^3}{12} + \frac{(2)(25)(12.5)^3}{12} = 1.383 \times 10^5 \text{ ft}^4$$

Dan

$$V = \frac{(600 \text{ tons})(2000 \text{ lb/ton})}{62.4 \text{ lb/ft}^3} = 1.923 \times 10^4 \text{ ft}^3$$

Akhirnya,

$$GB = \frac{1.383 \times 10^5}{1.923 \times 10^4} = 7.19 \text{ ft}$$

- 5.5. sebuah cairan mampu-mampat ke dalam sebuah silinder memiliki volume 1 liter (l) pada 1 MN/m<sup>2</sup> dan pada volum 995 cm<sup>3</sup> pada 2 MN/m<sup>2</sup>. Berapakah nilai modulus elastisitas?

**Penyelesaian :**

Untuk semua fungsinya sebuah cairan kadang dianggap tak dapat termampatkan, tapi pada situasi yang melibatkan perubahan tekanan yang tiba-tiba besar, daya mampatnya menjadi penting, dan ditunjukkan pada modulus elastisitas. Jika tekanan dari sebuah unit volume cairan di tingkatkan oleh  $dp$ , akan menyebabkan penurunan senilai  $-d$ ; rasio  $-dp/dv$  merupakan modulus elastisitas (E) untuk volume cairan apapun,

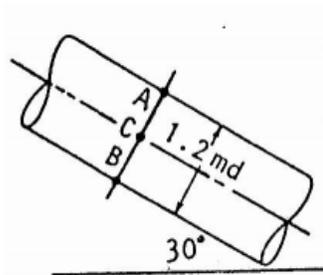
$$E = \frac{-dp}{dV/V}$$

Dimana E dilambangkan sebagai unit tekanan

Sekarang, substitusikan nilai pada persamaan yang digunakan

$$E = \frac{-\Delta p}{\Delta V/V} = \frac{-(2 - 1 \text{ MN/m}^2)}{\frac{995 - 1000}{1000}} = 200 \text{ MPa}$$

- 5.6. Aliran air melewati bagian dari pipa silinder. Bila tekanan statik pada titik c adalah 35 kPa, berapakah tekanan statik pada A dan B, dan dimanakah garis utama hidrolik pada bagian arus silangnya.



**Penyelesaian:**

Gunakan

$$P_A = P_C - \gamma h$$

$$P_A = P_C - \gamma(.6) \cos 30$$

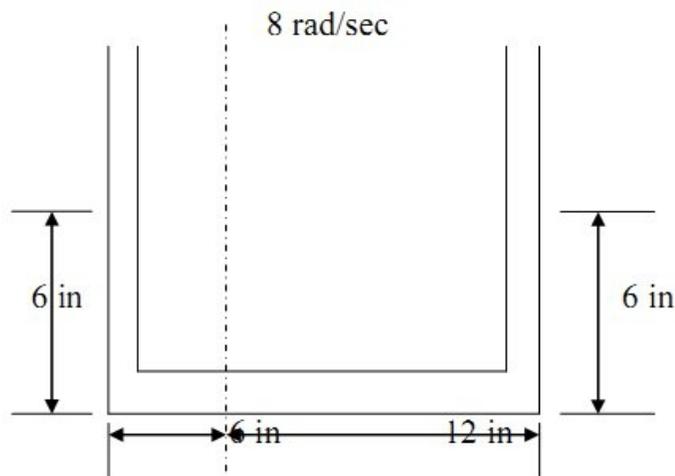
$$P_A = 35.0 \times 10^3 - (9.8 \times 10^3) (0.866) 0.6 = 29.9 \text{ kPa}$$

$$P_B = P_C + \gamma(.6) \cos 30^0$$

$$P_B = 35.0 \times 10^3 + (9.8 \times 10^3) (0.866) 0.6 = 40.1 \text{ kPa}$$

Garis utama hidroliknya adalah  $(35.0 \times 10^3) / 9.8 \times 10^3 = 3.57 \text{ m}$  vertikal diatas C.

- 5.7. Saat tabung yang berbentuk U tidak berotasi, ketinggian air berada pada seperti yang ditunjukkan pada gambar. Jika tabung diputar pada sekitar titik eksentrik pada kecepatan 8 rad/s, berapakah ketinggian air berikutnya pada tabung



**Penyelesaian:**

penyelesaian dari masalah ini berdasarkan pada persamaan untuk putaran pada sebuah tangki cairan.

$$\frac{p}{\gamma} + z - \frac{V^2}{2g} = \text{const}$$
$$V = r\omega$$

Dan juga berdasarkan pada fakta bahwa air memenuhi volume yang diberikan pada tabung, atau dengan kata lain panjang dan lebar dari tabung. Biarkanlah reverensi

peningkatannya berada pada level bagian horisontal dari tabung; lalu dengan mempertimbangkan sebuah titik pada permukaan air di bagian kiri tabung dimana  $p = 0$  dan juga sebuah titik pada permukaan kanan tabung, persamaan 1 dapat dituliskan sebagai berikut:

$$Z_1 - \frac{r_1^2 \omega^2}{2g} = Z_r - \frac{r_r^2 \omega^2}{2g}$$

Persamaan baru lainnya yang melibatkan volume tabung yang dipenuhi oleh cairan dapat ditulis sebagai berikut

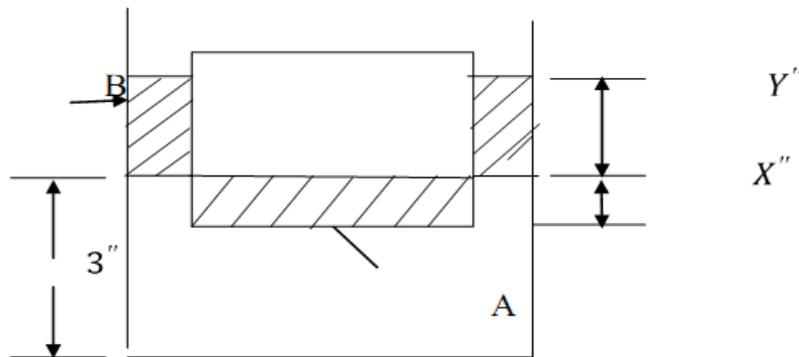
$$Z_1 + Z_r = 1.0$$

Ketika  $r_1 = \frac{1}{2}$  ft,  $r_r = 1$  ft dan  $\omega = 8$  rad/sec di substitusikan masuk ke dalam persamaan diatas maka penyelesaian untuk  $z_1$  dan  $z_r$  diperoleh

$$Z_1 = 0.12 \text{ ft}$$

$$Z_2 = 0.88 \text{ ft}$$

- 5.8. A berdiameter 4 inci silinder padat memiliki tinggi 3.75 inci dan bermassa 0.85 lb direndam pada cairan ( $\lambda = 52 \text{ lb/ft}^3$ ) yang ditampung dalam sebuah silinder metal tinggi yang berdiameter 5 inci (lihat gambar) sebelum direndamkan ke cairan dengan kedalaman 3 inch. Pada ketinggian berapakah silinder tersebut mengapung?



**Penyelesaian:**

$x$  = jarak silinder padat jatuh ke bawah dengan kondisi permukaan cairan yang sebenarnya

$y$  = jarak cairan yang meningkat diatas kondisi awal permukaannya.

$x + y =$  kedalaman rendaman

$$\text{Volume A} = \text{Volume B} \quad \pi 2^2 x = \pi(2.5^2 - 2.0^2)y$$

$$4x = 2.25y \quad x = 0.56y$$

$$F_B = \text{berat} = 0.85 = 52 \pi (2/12)^2 x + y/12$$

$$x + y = 2.24 \text{ in} \quad x = 0.81 \text{ in} \quad y = 1.43 \text{ in}$$

bagian bawah dari silinder padat bernilai  $3.0 - 0.81 = 2.91$  diatas pada bagian bawah silinder berongga.

- 5.9. Diskusikanlah stabilitas dari kepadatan seragam pada bagian lingkaran kanan dari kerucut yang sedang mengapung pada sebuah cairan dengan kepadatan dengan sumbu vertikal dan puncak mnghadap ke bawah.

**Penyelesaian:**

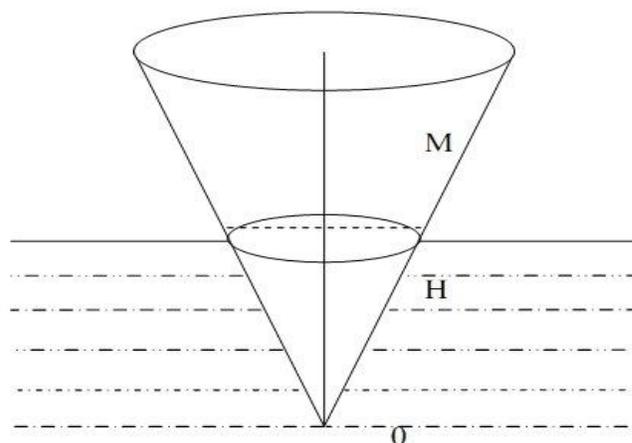
Katakanlah  $h$  menjadi titik tertinggi dari kerucut ,  $2\alpha$  sebagai sudut dan  $h'$  sebagai panjang dari sumbu yang terendam.

Pada kondisi ini  $A$  sebagai jari-ijari dari  $h'$   $\tan \alpha$  maka

$$Ak^2 = \frac{1}{4} \pi h'^4 \tan^4 \alpha^*$$

Dan

$$V = \frac{1}{3} \pi h'^3 \tan^2 \alpha$$



Tapi, jika  $O$  adalah puncak,  $OH = \frac{3}{4} h'$ , sehingga

$$OM = \frac{3}{4} h' \sec 2\alpha$$

Tapi  $OG = \frac{3}{4} h$ . Oleh karena itu kesetimbangan stabil atau tidak stabil bergantung pada

$$h' \sec 2\alpha > \text{ atau } < h.$$

Tapi, karena kerucut mengapung,  $\rho h'^3 = \sigma h^3$ , sehingga keseimbangan stabil atau tidak stabil bergantung pada

$$\sigma/\rho > \text{ atau } < \cos^6 \alpha$$

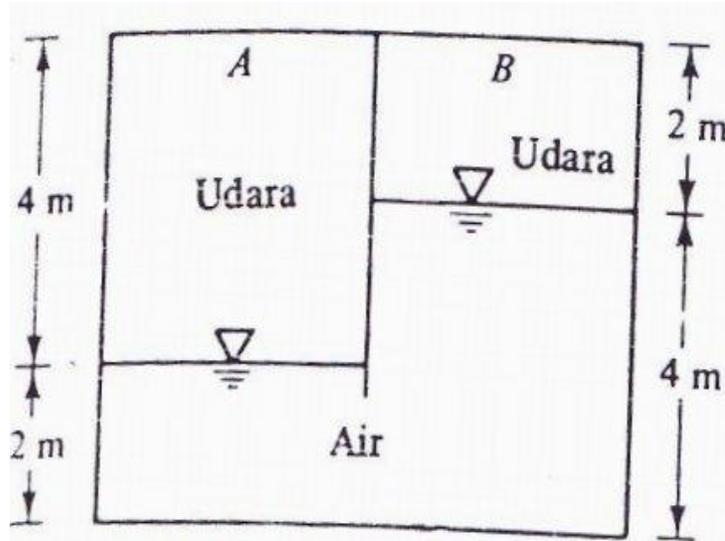
### C. PENUTUP

Diakhir pemberian materi pada bab ini, mahasiswa dapat *menjelaskan distribusi tekanan hidrostatik, keapungan dan kestabilan khususnya penerapan pada kapal, dan diberikan penilaian berdasarkan penguasaan materi dan terampil dan teliti dalam pengukuran tekanan*

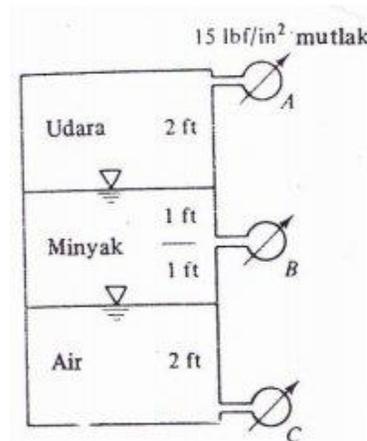
### TUGAS LATIHAN :

Kerjakanlah tugas dibawah ini, untuk soal nomor 3.8 – 3.10 diskusikanlah cara mengukur tekanan dengan menggunakan alat ukur tekanan yang telah dijelaskan pada materi pembelajaran ini.

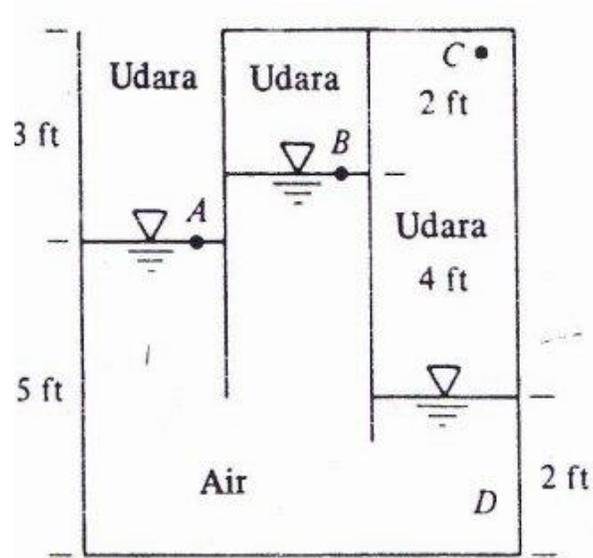
- 5.1. Setiap pembacaan tekanan pada suatu alat ukur dapat dinyatakan sebagai hulu atau panjang  $h = p/g$ . Berapakah tekanan standar pada permukaan laut jika dinyatakan dalam (a) meter air, (b) ft air, (c) inci raksa, (d) milimeter raksa?
- 5.2. Minyak tanah mempunyai berat jenis 0,81. berapa tinggi lajur minyak tanah yang menunjukkan tekanan 2000 Pa?
- 5.3. Tempat yang paling dalam di lautan, yang telah diketahui orang, ialah 11.034m di teluk Mariana di lautan Pasifik. Jika air laut mempunyai berat jenis yang tetap sebesar 10.050  $N/m^3$ , berapa atmosfer tekanan ditempat itu?
- 5.4. Tangki tertutup pada gambar dibawah ini suhunya 20°C. Kalau tekanan dititik A ialah 90.000 Pa(mutlak), berapakah tekanan mutlak di titik B dalam pascal?



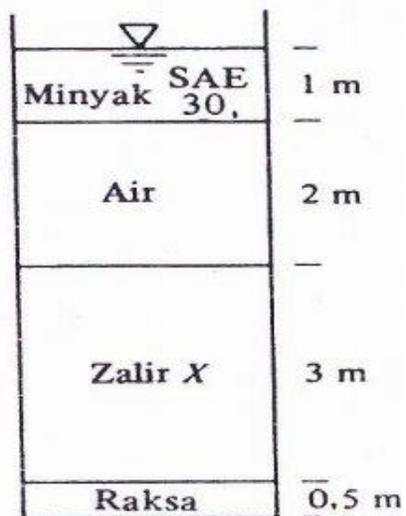
5.5. Sistem udara-minyak-air dalam gambar dibawah bersuhu  $20^{\circ}\text{C}$ . Kalau alat-ukur tekanan A menunjukkan  $15 \text{ lbf/in}^2$  mutlak dan alat ukur B menunjukkan  $1.25 \text{ lbf/in}^2$  lebih rendah daripada pembacaan alat ukur C, hitunglah (a) berat jenis minyak dalam pound gaya per ft kubik dan (b) pembacaan, sebenarnya dari alat ukur C dalam pound per kubik mutlak.



5.6. Sistem pada gambar dibawah ini bersuhu  $20^{\circ}\text{C}$ . Kalau tekanan di titik A  $2000 \text{ lbf/ft}^2$ , tentukan tekanan di titik B, C, dan D dalam pound per ft persegi.



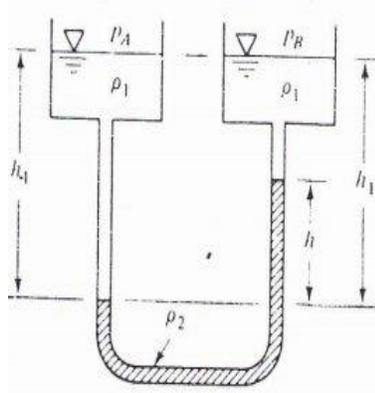
5.7. Sistem pada gambar dibawah ini suhunya 20<sup>0</sup>C. Jika tekanan atmosfer besarnya 101,33 kPa dan tekanan di dasar tangki itu 273 kPa, berapa bobot jenis fluida X?



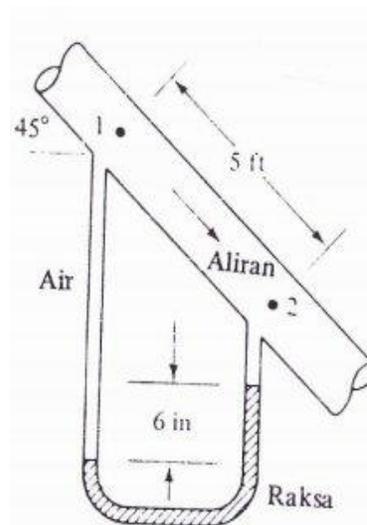
5.8. Bila pipa terbuka yang disebut piezometer dihubungkan dengan setangki zat air bertekanan tinggi, zat cair itu naik setinggi hulu piezometer atau hulu tekanan zat cair tersebut, kalau  $p$  ialah tekanan dititik A, tunjukkan bahwa ketiga piezometer permukaan zat cairnya sama, yakni  $h = pA/g$

5.9. Selisih tekanan PA-PB yang amat kecil dapat diukur dengan teliti dengan manometer diferensial dua zat cair dalam gambar dibawah ini. Rapat  $\rho_2$  hanya sedikit lebih besar

daripada rapat fluida yang di atas,  $\rho_1$ . Turunkan persamaan kesebandingan antara  $h$  dan  $p_A - p_B$  kalau tandon-tandonnya sangat besar.



- 5.10. Air mengalir turun pada sudut  $45^\circ$  dalam sebuah pipa, seperti tampak pada Gambar dibawah ini. Penurunan tekanan  $p_1-p_2$  sebagian disebabkan oleh gravitasi dan sebagian oleh gesekan. Manometer raksa itu menunjukkan beda tinggi permukaan sebesar 6 inci. Berapakah penurunan tekanan total  $p_1-p_2$  itu dalam pound gaya per inci persegi? Berapa selisih tekanan yang disebabkan oleh gesekan saja, antara titik 1 dan titik 2, dalam pound gaya per inci persegi? Apakah pembacaan manometer itu hanya menunjukkan pengaruh gesekan? Mengapa?



- 5.11. Sebuah pintu air yang lebarnya 8 ft, tingginya 10 ft dan engselnya di atas dipasang cacak dalam pintu air tersebut. Berapa besarnya gaya mendatar yang harus dikenakan pada pinggir bawah pintu air itu untuk membukanya?

#### **DAFTAR PUSTAKA**

1. White, F.M., 1996, Fluid Mechanics, Mcgraw-Hill, New York
2. Fogiel, M, 1986, The Fluid Mechanics and Dinamics Problem Solver, REA, New York
3. Munson Bruce, 2002, Fundamental of Fluid Mechanics fourth edition, John Willey and Sons, Inc
4. Fox, W Robert, 1994, Introduction to Fluid Mechanics, Fourth edition, John Willey and Sons, Inc

# BAB VI

## HUKUM PERTAMA TERMODINAMIKA-PERSAMAAN ENERGI

### 1. PENURUNAN PERSAMAAN ENERGI

Hukum Pertama termodinamika untuk sebuah sistem dinyatakan dengan kata-kata adalah

<i>Laju Pertambah an terhadap waktu dari energi</i>	=	<i>Laju netto pertambahan perpindahan energi dari kalor ke dalam sistem.</i>	+	<i>Laju netto pertambahan energi dari kerja yang dipindahkan ke dalam sistem</i>
---	---	--	---	--

Dalam bentuk simbolik, pernyataan ini menjadi :

$$\frac{D}{Dt} \int_{\text{sistem}} e \rho dV = (\sum Q_{\text{ke dalam}} - \sum Q_{\text{keluar}})_{\text{sistem}} + (\sum W_{\text{ke dalam}} - \sum W_{\text{keluar}})_{\text{sistem}}$$

atau

$$\frac{D}{Dt} \int_{\text{sistem}} e \rho dV = (Q_{\text{ke dalam netto}} + W_{\text{ke dalam netto}})_{\text{sistem}}$$

Beberapa dari variabel ini memerlukan penjelasan ringkas sebelum kita menuju ke pembahasan yang lebih lanjut lagi. Energi tersimpan total per satuan massa dari setiap partikel di dalam sistem,  $e$ , dihubungkan dengan energi dalam per satuan massa,  $\check{u}$ , energi kinetik per satuan massa  $V^2/2$ , dan energi potensial per satuan massa,  $gz$ , menurut persamaan

$$e = \check{u} + \frac{V^2}{2} + gz$$

Laju netto dari perpindahan kalor ke dalam sistem dinyatakan dengan  $Q_{\text{ke dalam netto}}$ , laju netto perpindahan kerja ke dalam sistem dinyatakan dengan  $W_{\text{ke dalam netto}}$ . Perpindahan kalor dan perpindahan kerja dianggap “+” jika berlangsung ke dalam sistem dan “-“ jika ke luar sistem.

Persamaan diatas berlaku untuk sistem acuan inersial maupun tak inersial. Kita akan mengembangkan pernyataan volume atur untuk hukum pertama termodinamika. Untuk volume atur yang berimpit dengan sistem tersebut pada suatu saat

$$(Q_{\text{ke dalam netto}} + W_{\text{ke dalam netto}})_{\text{sistem}} = (Q_{\text{ke dalam netto}} + W_{\text{ke dalam netto}})_{\text{volume kontrol berimpit}}$$

Lebih lanjut lagi, untuk sistem dan kandungan volume atur berimpit yang tetap dan tak berdeformasi, teorema transport Reynolds, memungkinkan kita untuk menyimpulkan bahwa

$$\frac{D}{Dt} \int_{\text{sistem}} e \rho dV = \frac{\partial}{\partial t} \int_{\text{cv}} e \rho dV + \int_{\text{cs}} e \rho \mathbf{V} \cdot \hat{n} dV$$

Atau dengan kata-kata,

<i>Laju pertambahan terhadap waktu dari energi tersimpan total</i>	=	<i>Laju pertambahan terhadap waktu dari energi tersimpan total</i>	+	<i>Laju aliran netto dari energi tersimpan total keluar volume atur melalui</i>
--	---	--	---	---

Dengan mengkombinasikan persamaan diatas, kita dapatkan rumus volume atur untuk hukum pertama termodinamika sebagai:

Total energi tersimpan per satuan massa,  $e$ , dalam persamaan diatas adalah untuk partikel-partikel fluida yang masuk, keluar, dan yang berada di dalam volume atur. Penjelasan lebih lanjut mengenai perpindahan kalor dan perpindahan kerja yang terlibat dalam persamaan ini adalah sebagai berikut.

Laju perpindahan kalor  $Q$ , mewakili seluruh cara dengan mana energi dipertukarkan antara kandungan volume atur dengan lingkungan sekitarnya akibat perbedaan temperatur. Jadi, radiasi, konduksi dan/atau konveksi merupakan cara-cara yang mungkin terjadi. Perpindahan kalor ke dalam volume atur dianggap positif, perpindahan ke luar volume atur dianggap negatif. Dalam banyak penerapan keteknikan, proses adalah *adiabatik*; laju perpindahan kalor,  $Q$ , adalah nol. Laju netto perpindahan kalor,  $Q$  ke dalam netto, dapat juga menjadi nol apabila

$$\sum Q_{\text{ke dalam}} - \sum Q_{\text{keluar}} = 0.$$

Laju perpindahan kerja,  $W$ , disebut juga *daya*, adalah positif jika kerja dilakukan oleh lingkungan sekitar pada kandungan volume atur. Jika sebaliknya, kerja dianggap negatif. Kerja dapat dipindahkan melintasi permukaan atur dengan beberapa cara. Dalam paragraf-paragraf berikut, kita meninjau beberapa bentuk

yang penting dari perpindahan kerja. Dalam banyak kasus, kerja dipindahkan melintasi permukaan atur melalui sebuah poros yang bergerak. Dalam peralatan yang berputar seperti turbin, kipas, dan baling-baling, sebuah poros yang berputar memindahkan kerja melintasi bagian permukaan atur yang mengiris poros tersebut. Bahkan di dalam mesin bolak-balik seperti kompresor dan motor pembakaran dalam tipe perpindahan positif yang menggunakan susunan piston-silinder, digunakan sebuah engkol poros yang berputar. Karena kerja adalah hasil perkalian titik dari gaya dengan perpindahan yang berkaitan, laju kerja (atau daya) adalah hasil perkalian titik dari gaya dengan perpindahan per satuan waktu yang berkaitan. Untuk sebuah poros berotasi, perpindahan daya,  $W_{\text{poros}}$ , berkaitan dengan torsi poros yang menyebabkan putaran,  $T_{\text{poros}}$ , dan kecepatan angular dari poros,  $\omega$ , dengan hubungan ketika permukaan atur memotong material poros, torsi poros diberikan oleh material poros pada permukaan atur. Untuk memungkinkan pertimbangan terhadap persoalan yang melibatkan lebih dari satu poros, kita gunakan notasi

$$W_{\text{poros ke dalam netto}} = \sum W_{\text{poros ke dalam}} - \sum W_{\text{poros keluar}}$$

Perpindahan kerja juga dapat terjadi pada permukaan atur apabila sebuah gaya yang berkaitan dengan tegangan normal fluida bekerja pada suatu jarak. Tinjaulah sebuah aliran pipa seperti yang diilustrasikan pada gambar dan volume atur yang ditunjukkan. Untuk situasi ini, tegangan normal fluida,  $\sigma$ , sama dengan nilai negatif dari tekanan fluida,  $p$ , dalam semua arah; artinya,

$$\sigma = -p$$

Hubungan tersebut dapat digunakan dengan berbagai perkiraan untuk banyak persoalan keteknikan. Yang bekerja pada sebuah partikel

Perpindahan daya yang berkaitan dengan tegangan-tegangan normal yang bekerja pada sebuah partikel fluida tunggal,  $dW_{\text{tegangan normal}}$ , dapat dievaluasi sebagai perkalian titik antara gaya tegangan normal,  $\delta F_{\text{tegangan normal}}$  dan kecepatan partikel fluida,  $V$ , sebagai

$$\delta W_{\text{tegangan normal}} = \delta F_{\text{tegangan normal}} \cdot V$$

Jika gaya tegangan normal dinyatakan sebagai perkalian dari tegangan normal

local,  $\sigma = -p$  dan luas permukaan partikel fluida,  $\tilde{n} \delta A$  maka hasilnya adalah

$$\delta \dot{W}_{\text{tegangan normal}} = \sigma \tilde{n} \delta A \cdot \mathbf{V} = -p \tilde{n} \delta A \cdot \mathbf{V} = -p \mathbf{V} \cdot \tilde{n} \delta A$$

Untuk seluruh partikel fluida pada permukaan atur dalam gambar pada saat yang ditinjau, perpindahan daya karena tegangan normal fluida,  $\dot{W}_{\text{tegangan normal}}$  adalah

$$\dot{W}_{\text{tegangan normal}} = \int_{CS} \sigma \mathbf{V} \cdot \tilde{n} dA = \int_{CS} -p \mathbf{V} \cdot \tilde{n} dA$$

Perhatikan bahwa nilai  $\dot{W}_{\text{tegangan normal}}$  untuk partikel-partikel permukaan dalam pipa yang terbasahi adalah nol karena disana  $\mathbf{V} \cdot \tilde{n}$  adalah nol. Jadi  $\dot{W}_{\text{tegangan normal}}$  dapat tidak nol hanya di tempat fluida masuk dan keluar dari volume atur.

Perpindahan kerja dapat juga terjadi pada permukaan atur akibat gaya tegang tangensial. Kerja poros yang berputar dipindahkan melalui tegangan tangensial dalam material poros. Untuk sebuah partikel fluida, daya dari gaya tegang geser,  $\delta \dot{W}_{\text{tegangan normal}}$  dapat dievaluasi sebagai perkalian titik dari gaya tegang tangensial,  $\delta F_{\text{tangensial stress}}$  dan kecepatan partikel fluida,  $\mathbf{V}$ , artinya;

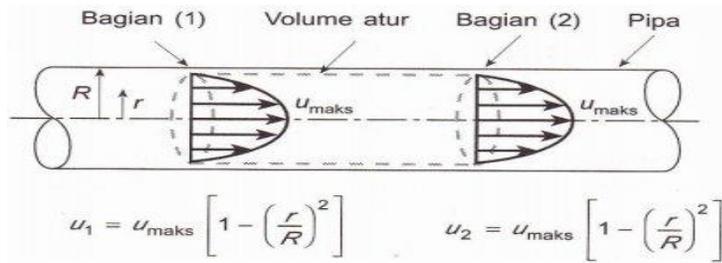
$$\delta \dot{W}_{\text{tegangan normal}} = \delta F_{\text{tangensial stress}} \cdot \mathbf{V}$$

Untuk volume atur pada gambar kecepatan partikel fluida adalah nol, diseluruh permukaan dalam pipa yang terbasahi. Jadi, tidak terdapat kerja tegangan tangensial yang dipindahkan melintasi bagian dari permukaan atur tersebut. Secara umum, kita memilih volume atur seperti yang ditunjukkan pada gambar 1 dan menganggap perpindahan daya tegangan tangensial sangat kecil dan dapat diabaikan.

Dengan menggunakan informasi yang telah kita kembangkan mengenai daya, kita dapat menyatakan hukum pertama termodinamika untuk kandungan volume atur dengan mengkombinasikan persamaan diatas untuk mendapatkan

$$\frac{\delta}{\delta t} \int_{cv} e p d + \int_{CS} e p \mathbf{V} \cdot \tilde{n} dA = \dot{Q}_{\text{ke dlm netto}} + \dot{W}_{\text{poros ked lm netto}} - \int_{CS} p \mathbf{V} \cdot \tilde{n} dA$$

Apabila persamaan untuk energi tersimpan total ditinjau dengan persamaan diatas, kita mendapatkan persamaan energi;



Gambar 6.1. Aliran pipa sederhana yang berkembang penuh

## 2. PENERAPAN PERSAMAAN ENERGI

Pada persamaan berikut suku  $\frac{\delta}{\delta t} \int_{cv} ep \, d$  mewakili laju perubahan terhadap waktu dari energy tersimpan total, e, dari kandungan volume atur. Suku ini nol apabila alirannya tunak. Suku ini juga nol secara rata-rata apabila aliran tunak secara rata-rata (siklis).

Pada persamaan dibawah, integran dari

$$\int_{cs} \left( \dot{u} + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz \right) \rho V \cdot \tilde{n} \, dA$$

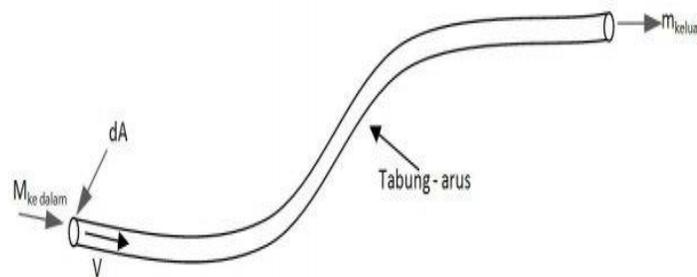
Dapat menjadi tidak nol hanya di tempat fluida melintasi permukaan atur (  $V \cdot \tilde{n} \neq 0$  ). Sebaliknya  $V \cdot \tilde{n}$  adalah nol dan integran juga nol untuk bagian dari permukaan atur tersebut. Jika sifat di dalam kurung,  $\dot{u}, \frac{p}{\rho}, \frac{v^2}{2}$  dan  $gz$  semua diasumsikan terdistribusi seragam diseluruh bidang penampang aliran yang terlibat, pengintegralan menjadi sederhana dan menghasilkan

$$\int_{cs} \left( \dot{u} + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz \right) \rho V \cdot \tilde{n} \, dA = \sum_{aliran \, keluar} \left( \dot{u} + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz \right) \dot{m} - \sum_{aliran \, masuk} \left( \dot{u} + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz \right) \dot{m}$$

Lebih jauh lagi, jika hanya terdapat satu aliran masuk dan keluar volume atur, maka

$$\int_{CS} \left( \dot{u} + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz \right) \rho V \cdot \dot{n} \, dA = \left( \dot{u} + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz \right)_{\text{keluar}} \dot{m}_{\text{keluar}} - \left( \dot{u} + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz \right)_{\text{masuk}} \dot{m}_{\text{masuk}}$$

Aliran seragam sebagaimana yang digambarkan di atas akan terjadi di dalam tabung arus (*streamtube*) yang berdiameter sangat kecil seperti diilustrasikan pada gambar 6.2.



Gambar 6.2. Aliran tabung – arus

Apabila kerja poros terlibat, aliran pasti taktunak, setidaknya secara local. Aliran di dalam mesin fluida apapun yang melibatkan kerja poros adalah taktunak didalam mesin tersebut. Sebagai contoh, kecepatan dan tekanan pada lokasi yang tetap di dekat sudu yang berotasi dari sebuah kipas bersifat aliran taktunak. Namun di hulu dan di hilir mesin tersebut, alirannya mungkin tunak. Kerap kali, kerja poros dikaitkan dengan aliran yang taktunak secara berulang atau secara siklis. Berdasarkan rata-rata waktu untuk aliran yang satu dimensi, siklis dan melibatkan hanya satu arus fluida masuk dan keluar volume atur, persamaan diatas dapat disederhanakan dengan bantuan persamaan berikut dan menjadi:

$$\dot{m} \ddot{u}_{\text{keluar}} - \ddot{u}_{\text{kedalam}} + \left( \frac{p}{\rho} \right)_{\text{keluar}} - \left( \frac{p}{\rho} \right)_{\text{kedalam}} + \frac{V_{\text{keluar}}^2 + V_{\text{kedalam}}^2}{2} + g(Z_{\text{keluar}} - Z_{\text{kedalam}}) = \dot{Q}_{\text{kedalam netto}} + \dot{W}_{\text{shaft kedalam netto}}$$

Persamaan diatas disebut *Persamaan energy satu dimensi untuk aliran yang tunak secara rata-rata*. Persamaan ini berlaku untuk aliran-aliran tak mampu-mampat dan mampu-mampat. Sering kali sifat fluida yang disebut *entalpi*,  $h$

dimana  $\check{h} = \check{u} + \frac{p}{\rho}$

Digunakan dalam persamaan. Dengan entalpi, persamaan energy satu dimensi untuk aliran yang tunak secara rata-rata. Persamaan menjadi

$$\dot{m}\check{h}_{keluar} - \check{h}_{kedalam} + \left(\frac{p}{\rho}\right)_{keluar} - \left(\frac{p}{\rho}\right)_{kedalam} + \frac{V_{keluar}^2 + V_{kedalam}^2}{2} + g(z_{keluar} - z_{kedalam}) = \dot{Q}_{kedalam\ netto} + \dot{W}_{shaft\ kedalam\ netto}$$

Persamaan diatas sering digunakan untuk menyelesaikan persoalan aliran mampu-mampat.

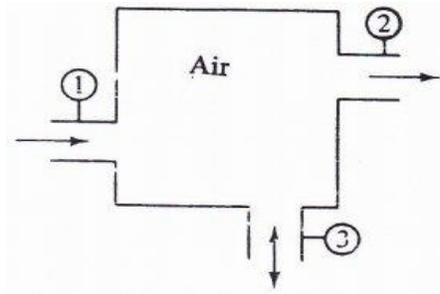
### C. PENUTUP

Diakhir pemberian materi pada modul ini, mahasiswa dapat menjelaskan dan menerapkan hukum dasar mekanika fluida pada kasus masalah yang terjadi di kapal, dan diberikan penilaian berdasarkan kejelasan uraian dengan kriteria penilaian adalah kreativitas dan kerjasama tim pada presentasi.

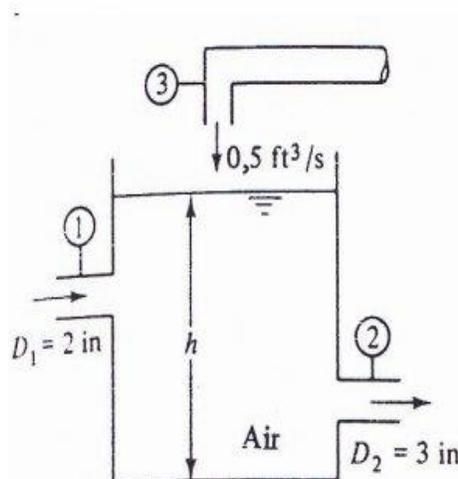
### TUGAS LATIHAN

Tugas latihan ini dibagi menjadi empat kelompok dan setiap kelompok membuat poster dan menjelaskan pemakaian hukum dasar mekanika fluida dari tugas yang dikerjakan dan dipresentasikan .

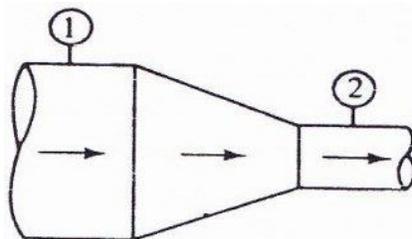
- 6.1. Air pada suhu 20<sup>0</sup>C dan tekanan 1 atm mengalir melalui pipa bergaris tengah 6 inci dengan kecepatan rata-rata 20 ft/s. Hitunglah (a) debitnya dalam meter perkubik, (b) debitnya dalam galon per menit ( 1 gal Amerika = 231 inci kubik ) dan (c) fluks-beratnya dalam pound gay per sekon.
- 6.2. Air mengalir dengan tunak melalui sebuah kotak di tiga tampang seperti pada gambar dibawah ini. Tampang 1 bergaris tengah 3 inci dan aliran masuknya berdebit 1 ft<sup>3</sup>/s. Tampang 2 bergaris tengah 2 inci dan aliran keuarnya mempunyai kecepatan rata-rata 30ft/s. Hitunglah kecepatan rata-rata dan debit di tampang 3 kalau D3 = 1 inci. Masuk atau keluarkah aliran di tampang 3?



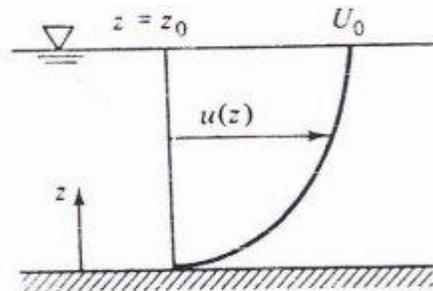
- 6.3. Tangki air dalam gambar dibawah sedang diisi melalui tampang 1 dengan kecepatan  $V_1 = 10 \text{ ft/s}$  dan melalui tampang 3 dengan debit  $0,5 \text{ ft}^3/\text{s}$ . Kalau tinggi permukaan air  $h$  itu tetap., tentukan kecepatan aliran keluar  $V_2$  dalam kaki per sekon.



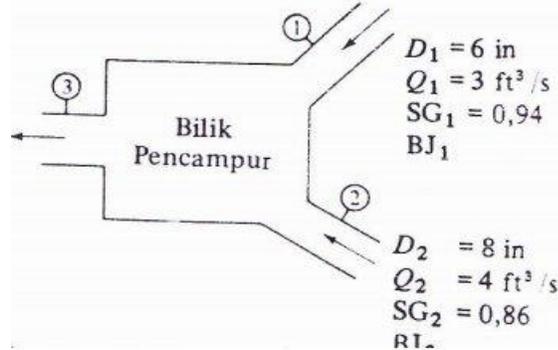
- 6.4. Air mengalir dengan tunak melalui cerat dalam gambar dibawah dengan fluks massa  $50 \text{ kg/s}$ . Garis tengahnya ialah  $D_1 = 20 \text{ cm}$  dan  $D_2 = 6 \text{ cm}$ . Hitunglah kecepatan rata-rata di tampang 1 dan tampang 2 dalam meter per sekon.



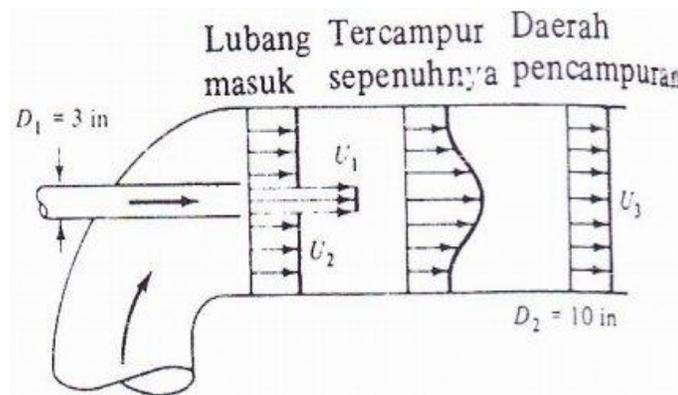
- 6.5. Sebuah pompa bensin mengisi tangki berkapasitas 75 liter dalam waktu 1 menit lebih 10 sekond. Kalau garis tengah ujung pompa itu 3 cm, berapakah kecepatan rata-rata keluarnya aliran pompa itu dalam sentimeter per sekond?
- 6.6. Sebuah tangki yang berisi udara dengan suhu  $20^{\circ}\text{C}$  dan tekanan 100 kPa akan dikosongkan dengan pompa penghisap. Volume tangki itu  $1\text{ m}^3$ , dan pompa tersebut menyedot udara dengan debit 80 liter/menit, berapa pun tekanannya. Kalau udara itu dianggap sebagai gas sempurna dan prosesnya dianggap isothermal. Tentukan waktu dalam satuan menit yang diperlukan untuk mengurangi tekanan udara dalam tangki itu sampai tinggal 1 kPa. Petunjuk : soal ini menghasilkan persamaan diferensial orde 1.
- 6.7. Air mengalir melalui kanal yang lebar dan rata dengan profil kecepatan bergolak  $u \approx U_0 (z/z_0)^{1/7}$ , seperti tampak pada gambar dibawah. Kalau  $U_0 = 2,8\text{ ft/s}$  dan  $z_0 = 8\text{ ft}$ , hitunglah debit dan fluks berat dalam kanal itu persatuan lebarnya (ke dalam kertas)



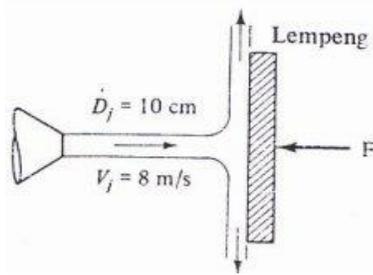
- 6.8. Dua fluida tercampurkan yang BJnya berbeda masuk melalui tampang 1 dan tampang 2, seperti pada gambar dibawah. Kalau alirannya tunak dan pencampurannya sempurna sebelum keluar, hitunglah kecepatan rata-rata, fluks massa, dan bobot jenis campuran itu ketika melalui tampang 3.



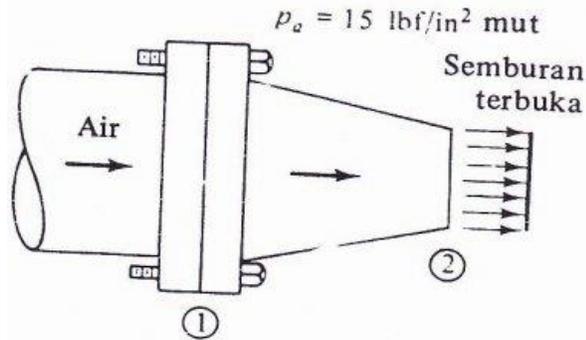
- 6.9. Pompa semburan air dalam gambar dibawah menyembrotkan air dengan kecepatan  $U_1 = 100 \text{ ft/s}$  melalui pipa berdiameter 3 inci dan bergabung dengan aliran air yang kedua yang kecepatannya  $U_2 = 10 \text{ ft/s}$  di daerah cincin di sekeliling pipa kecil itu. Kedua aliran itu menjadi tercampur sungguh-sungguh pada daerah hilir, tempat  $U_3$  kira-kira tetap. Kalau aliran itu tunak dan takmampu-mampat, hitunglah  $U_3$  dalam kaki per sekon.



- 6.10. Semburan air pada gambar dibawah mengenai lempeng yang letaknya tetap pada arah normal. Abaikan gravitasi dan gesekan, dan tentukan gaya  $F$  yang perlu untung mempertahankan posisi lempeng itu, dalam Newton.

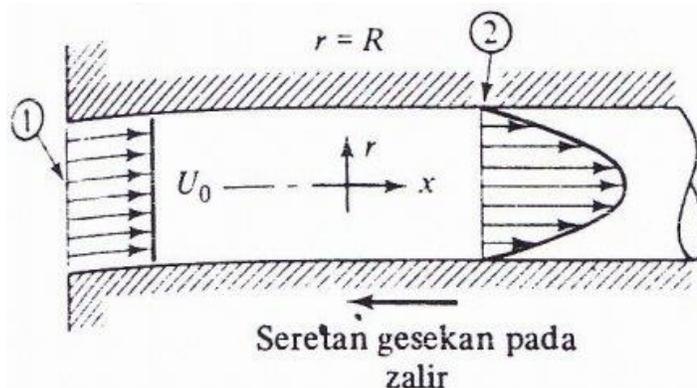


- 6.11. Cerat mendatar pada gambar dibawah mempunyai garis tengah  $D_1 = 8$  inci dan  $D_2 = 4$  inci. Tekanan pada tampang masuknya  $p_1 = 50 \text{ lbf/in}^2$  mutlak, dan



kecepatan di tampang keluaranya  $V_2 = 72 \text{ ft/s}$ . Tentukan gaya yang diberikan oleh baut karahnya untuk mempertahankan cerat itu pada selang. Anggaplah alirannya tunak dan takmampu-mampat.

- 6.12. Aliran pada gambar dibawah adalah minyak ( $\text{BJ}=0,86$ ) yang kecepatannya di lubang masuk  $U_0 = 50 \text{ cm/s}$ , dan  $R=3 \text{ cm}$ . Tekanannya ketika masuk ialah  $p_1 = 110 \text{ kPa}$ , sedang gaya gesekannya di antara 1 dan 2 terukur  $15 \text{ N}$ . Berapa tekanan  $p_2$  dalam kilopascal?



## **DAFTAR PUSTAKA**

1. White,F.M., 1996, Fluid Mechanics, Mcgraw-Hill, New York
2. Fogiel, M, 1986, The Fluid Mechanics and Dinamics Problem Solver, REA, New York
3. Munson Bruce, 2002, Fundamental of Fluid Mechanics fourth edition, John Willey and Sons, Inc
4. Fox,W Robert, 1994, Introduction to Fluid Mechanics, Fourth edition, John Willey and Sons, Inc

## BAB VII

### ALIRAN DI DALAM PIPA -BUNDAR (FLOW IN A CIRCULAR PIPE)

Sebagai contoh kita yang pertama tentang analisis aliran-kental yang khusus, kita tinjau soal klasik mengenai aliran dalam pipa yang penuh, yang disebabkan oleh tekanan atau gravitasi atau keduanya. Gambar 7.1 memperlihatkan geometri pipa yang bergaris-tengah R itu. Sumbu x dipilih pada arah aliran dan miring terhadap garis mendatar dengan sudut  $\phi$ .

Sebelum melangkah ke penyelesaian persamaan gerak, kita dapat belajar banyak dengan melakukan analisis volume kendali dari aliran itu antara tampang 1 dan tampang 2 dalam Gambar 7.1. Persamaan menjadi

$$Q_1 = Q_2$$

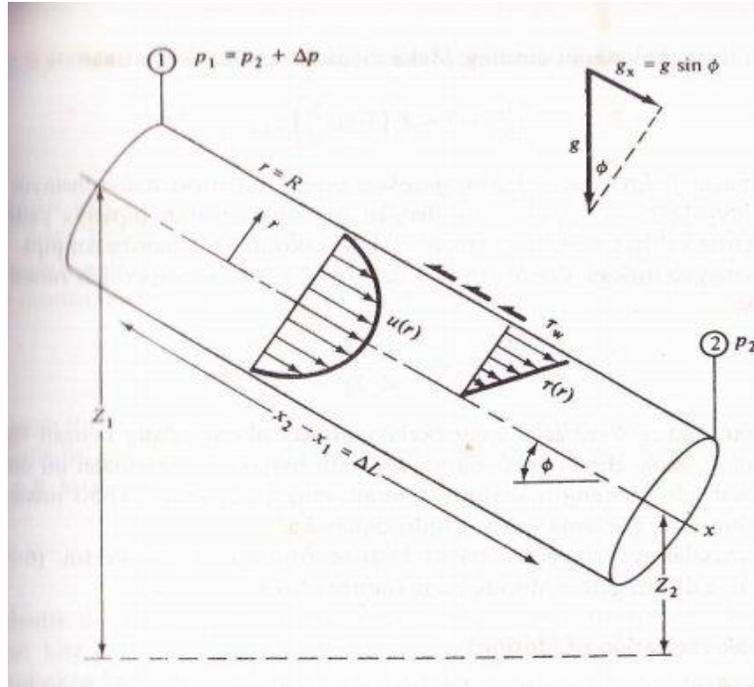
$$\text{Atau} \quad V_1 = \frac{Q_1}{A_1} = V_2 = \frac{Q_2}{A_2}$$

Sebab pipanya mempunyai tampang yang luasnya tetap. Persamaan tenaga aliran tunak menjadi

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2} \alpha_1 V_1^2 + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} \alpha_2 V_2^2 + gz_2 + gh_f$$

Sebab tak ada efek usaha-poros atau pemindahan bahang. Sekarang kita anggap alirannya telah berkembang penuh (Gambar 7.1) dan nanti kita koreksi dengan efek lubang-masuk. Maka faktor galat tenaga gerak  $\alpha_1 = \alpha_2$  dan karena  $V_1 = V_2$  menurut Persamaan. dibawah, sekarang Persamaan menjadi rumus yang disederhanakan untuk kerugian hulu gesekan  $h_f$

$$h_f = \left( z_1 + \frac{p_1}{\rho g} \right) - \left( z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \right) = \Delta \left( z + \frac{p}{\rho g} \right) = \Delta z + \frac{\Delta p}{\rho g} .$$



Gambar 7.1. Volume kendali aliran yang telah berkembang penuh antara dua tampang dalam sebatang pipa miring.

Kerugian hulu-pipa tersebut sama dengan perubahan jumlah hulu tekanan dan hulu gravitasi, dengan kata lain perubahan tinggi. Karena hulu kecepataannya tetap sepanjang pipa itu,  $h_f$  juga sama dengan perubahan tinggi.

Akhirnya kita terapkan persamaan momentum pada volume kendali dalam gambar 7.1 dengan memperhitungkan gaya-gaya yang disebabkan oleh tekanan, medan gravitasi dan gesaran.

$$\Delta p \pi R^2 + \rho g (\pi R^2) \Delta L \sin \phi - \tau_w (2\pi R) \Delta L = m(V_1 - V_2) = 0$$

Persamaan ini menghubungkan  $h_f$  dengan tegangan sesar dinding

$$\Delta Z + \frac{\Delta p}{\rho g} = h_f = \frac{2\tau_w \Delta L}{\rho g R}$$

Di mana kita telah memasukkan  $\Delta Z = \Delta L \sin \phi$  dari Gambar 7.1

Sejauh ini belum kita andaikan apakah alirannya berlapis atau bergolak. Kalau kita dapat mengkorelasikan dengan kondisi aliran, kita telah memecahkan masalah

kerugian hulu dalam aliran pipa. Dapat kita andaikan bahwa fungsinya

$$\tau_w = F(\rho, V, \mu, d, \epsilon)$$

Di mana  $\epsilon$  ialah tinggi kekasaran-dinding. Maka menurut analisis dimensi;

$$\frac{8\tau_w}{\rho V^2} = f = F\left(Re_d, \frac{\epsilon}{d}\right)$$

Parameter tak berdimensi  $f$  dinamakan *faktor gesekan darcy*, menurut nama insinyur Perancis, Henry Darcy (1803-1858), yang dengan percobaan aliran pipanya pada tahun 1850 buat pertama kalinya mengungkapkan efek kekasaran pada hambatan pipa.

Dengan menggabungkan Persm. diatas, kita memperoleh rumus untuk kerugian hulu-pipa.

$$h_f = f \frac{L V^2}{d 2g}$$

Inilah *persamaan Darcy-Weisbach*, yang berlaku untuk aliran pipa dengan penampang lintang sembarang, baik alirannya berlapis, maupun bergolak. Persamaan ini diusulkan oleh Julius Weisbach, seorang mahafuru Jerman yang pada tahun 1850 menerbitkan buku-teks modern yang pertama tentang hidrodinamika.

Sekarang masalahnya tinggal mencari bentuk fungsi  $F$  dalam Persm. diatas dan menggrafikkannya dalam Diagram Moody pada gambar.

## 1. PENYELESAIAN ALIRAN BERLAPIS (LAMINAR-FLOW SOLUTION)

Profil aliran berlapis berupa sebuah paraboloid yang turun ke nol pada dinding dan mencapai maksimumnya pada sumbu

$$u_{maks} = \frac{R^2}{4\mu} \left[ -\frac{d}{dx} (p + \rho g z) \right]$$

Profil ini mirip dengan sketsa  $u(r)$  dalam gambar

Hasil-hasil lainnya untuk debit aliran pipa diperoleh

$$\begin{aligned} Q &= \int u \, dA = \int_0^R u_{maks} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) 2\pi r \, dr \\ &= \frac{1}{2} u_{maks} \pi R^2 = \frac{\pi R^4}{8\mu} \left[ -\frac{d}{dx} (p + \rho g z) \right] \end{aligned}$$

Jadi kecepatan rata-rata dalam aliran berlapis ialah separuh kecepatan maksimumnya.

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi R^2} = \frac{1}{2} u_{maks}$$

Untuk tabung yang mendatar (Persamaan diatas) mempunyai bentuk yang diramalkan dari percobaan Hagen, yakni Persm. (6-1)

$$\Delta p = \frac{8\mu L Q}{\pi R^4}$$

Regangan dindingnya dihitung dari landai kecepatan pada dinding

$$\tau_w = \left| \mu \frac{du}{dr} \right|_{r=R} = \frac{2\mu u_{maks}}{R} = \frac{1}{2} R \left| \frac{d}{dx} (p + \rho g z) \right|$$

Ini memberikan teori yang eksak untuk *faktor gesekan Darcy aliran berlapis*

$$f = \frac{8\tau_w}{\rho V^2} = \frac{8(8\mu V/d)}{\rho V^2} = \frac{64\mu}{\rho V d}$$

$$f_{lp} = \frac{64}{Re_d}$$

Ini digambarkan pada diagram Moody dalam gambar. Kenyataan bahwa  $f$  menurun dengan bertambahnya  $Re_d$  jangan sampai menyesatkan kita untuk mengira bahwa regangan menurun dengan kecepatan: Persamaan. diatas dengan jelas menunjukkan  $\tau_w$  sebanding dengan  $u_{maks}$ , dan yang menarik ialah bahwa  $w$  juga tak tergantung pada kerapatan sebab percepatan fluida itu nol.

Kerugian hulu dalam aliran berlapis dapat diturunkan dari Persamaan dibawah.

$$h_{f.lp} = \frac{64\mu}{\rho V d} \frac{L V^2}{d 2g} = \frac{32\mu L V}{\rho g d^2} = \frac{128\mu L Q}{\pi \rho g d^4}$$

Tampak bahwa kerugian hulu berlapis in sebanding dengan  $V$ .

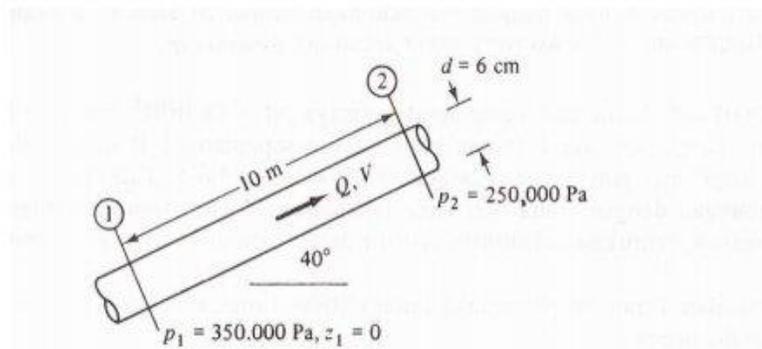
### CONTOH SOAL

Minyak dengan  $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$  dan  $\nu = 0,0002 \text{ m}^2/\text{s}$  mengalir ke atas melalui pipa miring seperti dalam gambar dibawah. Tekanan dan elevasinya diketahui pada

tampang 1 dan 2 yang terpisah dengan jarak 10 m. Kalau diandaikan bahwa alirannya berlapis dan tunak. (a) tunjukkan bahwa arah alirannya benar-benar ke atas, (b) hitunglah  $h_f$  antara 1 dan 2, dan hitung (c)  $Q$ , (d)  $V$  dan (e) Red. Sungguh-sungguh berlapiskah aliran ini?

$$\mu = \rho\nu = (900 \text{ kg/m}^3)(0,0002 \text{ m}^2/\text{s}) = 0,18 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$$

$$z_2 = \Delta L \sin 40^\circ = (10 \text{ m})(0,643) = 6,43 \text{ m}$$



Alirannya pada arah menurunnya, karena itu kita hitung tinggi garis aras di setiapampang

$$GAH_1 = z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = 0 + \frac{350,000}{900(9,807)} = 39,65 \text{ m}$$

$$GAH_2 = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} = 6,43 + \frac{250,000}{900(9,807)} = 34,75 \text{ m}$$

GAH-nya lebih rendah di tampang 2, jadi alirannya dari 1 menuju 2, sesuai dengan informasi dari soal.

(b) kerugian hulu ialah perubahan tinggi GAH

$$h_f = GAH_1 - GAH_2 = 39,65 \text{ m} - 34,75 \text{ m} = 4,9 \text{ m}$$

Sepuluh panjang pipa adalah kerugian hulu yang cukup besar.

(c) Kita dapat menghitung  $Q$  dengan berbagai rumus aliran berlapis, khususnya Persm. (6-47)

$$Q = \frac{\pi \rho g d^4 h_f}{128 \mu L} = \frac{\pi(900)(9,807)(0,06)^4(4,9)}{128(0,18)(10)} = 0,0076 \text{ m}^3/\text{s}$$

(d) Setelah  $V$  diketahui maka bilangan Reynoldnya ialah

$$Re_d = \frac{Vd}{\nu} = \frac{2,7(0,06)}{0,0002} = 810$$

Ini cukup jauh di bawah nilai transisi  $Re_d = 2300$ , sehingga kita cukup yakin bahwa alirannya berlapis.

Perhatikan bahwa dengan menggunakan satuan SI secara nyata dalam seluruh perhitungan ini, faktor konversi sama sekali tak diperlukan.

## 2. PENYELESAIAN ALIRAN BERGOLAK (TURBULENT-FLOW SOLUTION)

Untuk aliran-pipa yang bergolak, kita tak perlu menyelesaikan persamaan diferensial, melainkan cukup memakai hukum logaritmik saja, seperti mengkorelasikan kecepatan rata-rata lokal  $u(r)$  di seluruh panjang pipa

$$\frac{u(r)}{u^*} \approx \frac{1}{k} \ln \frac{(R-r)u^*}{\nu} + B$$

Di mana kita telah mengganti  $y$  dengan  $R - r$ . Dari profil ini kita hitung kecepatan reratanya

$$\begin{aligned} V &= \frac{Q}{A} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R u^* \left[ \frac{1}{K} \ln \frac{(R-r)u^*}{\nu} + B \right] 2\pi r \, dr \\ &= \frac{1}{2} u^* \left( \frac{2}{k} \ln \frac{Ru^*}{\nu} + 2B - \frac{3}{K} \right) \end{aligned}$$

Kalau kita masukkan  $k = 0,41$  dan  $B = 5,0$ , kita dapatkan hasil numeris

$$\frac{V}{u^*} \approx 2,44 \ln \frac{Ru^*}{\nu} + 1,34$$

Ini hanya nampak agak menarik, sampai kita menyadari bahwa  $V/u^*$  terkait langsung dengan faktor gesekan Darcy

$$\frac{V}{u^*} = \left( \frac{\rho V^2}{\tau_w} \right)^{1/2} = \left( \frac{8}{f} \right)^{1/2}$$

Lagipula argumen logaritma dalam Persamaan dibawah setara dengan

$$\frac{Ru^*}{v} = \frac{\frac{1}{2}Vd}{v} \frac{u^*}{V} = \frac{1}{2} Re_d \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2}$$

kalau Persamaan diatas kita masukkan ke dalam Persamaan dibawahnya, basis logaritmanya kita ubah dari e ke 10, dan suku-sukunya kita atur, kita peroleh

$$\frac{1}{f^{1/2}} \approx 1,99 \log(Re_d f^{1/2}) - 1,02$$

Dengan kata lain, semata-mata hanya dengan menghitung kecepatan rata-rata dari korelasi hukum logaritmik, kita mendapatkan hubungan antara faktor gesekan dan bilangan Reynolds untuk aliran pipa bergolak. Prandtl menurunkan Persamaan dibawah pada tahun 1935 dan kemudian disesuaikan tetapannya sedikit agar lebih cocok dengan data, dan hasilnya ialah

$$\frac{1}{f^{1/2}} = 2,0 \log(Re_d f^{1/2}) - 0,8$$

Ini merupakan rumus yang diterima untuk pipa berdinding halus. Beberapa nilai numeris dapat diuraikan sebagai berikut

$Re_d$	4000	$10^4$	$10^5$	$10^6$	$10^7$	$10^8$
$f$	0,0399	0,0309	0,0180	0,0116	0,0081	0,0059

Jadi  $f$  turun hanya dengan faktor 5 saja melalu selang kenaikan bilangan Reynolds yang bertambah 10.000 kali. Persamaan diatas sukar diselesaikan kalau  $Re_d$  diketahui dan  $f$  yang dicari. Dalam literatur banyak pendekatan lain untuk menghitung  $f$  secara eksplisit dari  $Re_d$

$$\begin{cases} 0,316 Re_d^{-1/4} & 4000 < Re_d < 10^5 \text{ H. Blasius (1911)} \\ 1,02 \log Re_d^{-2.5} & \text{F. white (1974)} \end{cases}$$

Blasius, mahasiswa Prandtl, menyajikan rumusnya dalam korelasi yang pertama antara gesekan pipa versus bilangan Reynolds. Meskipun rumus Blasius itu hanya berlaku untuk selang bilangan Reynolds yang terbatas, rumus itu melukiskan apa yang sedang terjadi dengan data penurunan tekanan Hagen pada tahun 1839. Untuk pipa mendatar, dari Persm. diatas kita dapatkan

$$h_f = \frac{\Delta p}{\rho g} = f \frac{L V^2}{d 2g} \approx 0,316 \left( \frac{\mu^{\frac{1}{4}}}{\rho V d} \right) \frac{L V^2}{d 2g}$$

$$\Delta p \approx 0,158 L p^{3/4} \mu^{1/4} d^{-4,75} Q^{1,75}$$

Untuk bilangan Reynolds bergolak yang kecil. Perhatikan bahwa hanya berubah-ubah sedikit dengan kekentalan; ini adalah ciri khas aliran bergolak. Kalau kita masukkan  $Q = 1/4\pi d^2 V$  ke dalam Persamaan diatas, kita dapatkan bentuk alternatif

$$\Delta p \approx 0,24 L p^{3/4} \mu^{1/4} d^{-4,75} Q^{1,75}$$

Untuk debit Q tertentu, penurunan tekanan bergolak turun dengan garis tengah pipa dengan tajam,----- lebih tajam daripada yang terjadi pada aliran berlapis menurut Persm. (6-19). Maka cara yang paling cepat untuk mengurangi tekanan yang diperlukan untuk memompa ialah dengan memperbesar ukuran pipa, walaupun barang tentu pipa yang lebih besar akan lebih mahal. Untuk Q tertentu, melipat duakan ukuran pipa akan menurunkan dengan faktor.

Kecepatan maksimum dalam aliran pipa bergolak diperoleh dari Persm. diatas dengan memasukkan  $r = 0$

$$\frac{u_{maks}}{u^*} \approx \frac{1}{k} \ln \frac{R u^*}{v} + B$$

Kalau ini kita gabungkan dengan Persamaan diatas kita dapatkan rumus yang menghubungkan kecepatan maksimum

$$\frac{V}{u_{maks}} \approx (1 + 1,33\sqrt{f})^{-1}$$

Beberapa nilai numerisnya adalah sebagai berikut

$Re_d$	4000	$10^4$	$10^5$	$10^6$	$10^7$	$10^8$
$V/u_{maks}$	0,790	0,811	0,849	0,875	0,893	0,907

## SOAL LATIHAN

1. Air mengalir melalui pipa besi berdiameter 50 cm. Kekentalan kinematik air  $1,3 \times 10^{-4}$

$6 \text{ m}^2/\text{det}$ . Pipa tersebut mempunyai kekasaran ( $k$  atau  $\epsilon$ ) =  $4,6 \times 10^{-5} \text{ m}$ . Jika kehilangan tenaga maksimum yang diijinkan sebesar  $1 \text{ m/km}$ , hitunglah:

- a. Kecepatan aliran
  - b. Angka Reynolds
  - c. Debit alirannya.
2. Dua buah kolam mempunyai beda elevasi  $30 \text{ m}$ . Kedua kolam tersebut dihubungkan dengan pipa 1 dan 2. Karakteristik masing-masing pipa adalah  $L_1 = 500 \text{ m}$ ,  $L_2 = 750 \text{ m}$ ,  $D_1 = 25 \text{ cm}$ ,  $D_2 = 30 \text{ cm}$ ,  $f_1 = 0,012$  dan  $f_2 = 0,010$ . Hitunglah debit yang mengalir di sistem pipa tersebut dan panjang pipa ekuivalen ( $D_e = 20 \text{ cm}$ ,  $f_e = 0,010$ ) jika:
- a. Pipa disambung seri
  - b. Pipa disambung paralel
3. Sebuah pipa air minum (pipa 1) dengan diameter  $60 \text{ cm}$  mengalirkan air dengan kecepatan  $10 \text{ m/detik}$ . Pipa tersebut kemudian bercabang, menjadi pipa 2 dan pipa 3, dengan diameter masing-masing  $20 \text{ cm}$  dan  $10 \text{ cm}$ . Jika kecepatan di pipa 3 sebesar  $20 \text{ m/detik}$ , hitunglah debit di pipa 1 dan kecepatan di pipa 2.

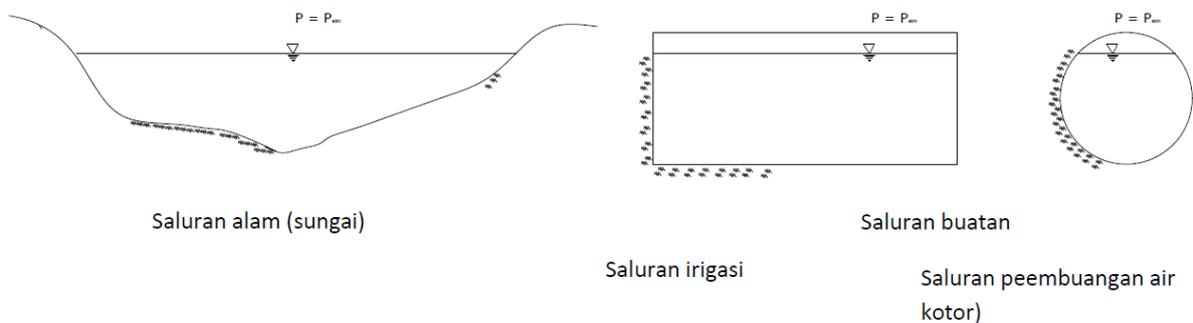
## BAB VIII

### ALIRAN MELALUI SALURAN TERBUKA

#### 8.1. Pendahuluan

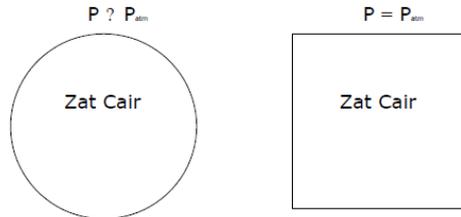
Aliran air dalam suatu saluran dapat berupa aliran dalam saluran terbuka, dan dapat pula berupa aliran dalam pipa. Kedua jenis aliran tersebut memiliki prinsip yang sangat berbeda. Aliran melalui saluran terbuka adalah aliran yang memiliki permukaan bebas sehingga memiliki tekanan udara walaupun berada dalam saluran yang tertutup, dengan contoh saluran terbuka pada Gambar 8.1. Adapun aliran dalam pipa merupakan aliran yang tidak memiliki permukaan bebas, karena aliran air mengisi saluran secara terus menerus, sehingga tidak dipengaruhi oleh tekanan udara dan hanya dipengaruhi oleh tekanan hidrostatik.

Analisis yang dilakukan pada saluran terbuka lebih sulit dibandingkan analisis yang dilakukan pada aliran dalam pipa dan pada umumnya analisis pada saluran terbuka menggunakan persamaan-persamaan empiris. Hal tersebut dilakukan karena analisis aliran pada saluran terbuka memiliki banyak variabel yang berubah-ubah dan tidak teratur terhadap ruang dan waktu. Variabel-variabel tersebut antara lain penampang saluran, kekasaran permukaan saluran, kemiringan saluran, debit aliran, kecepatan aliran, pertemuan saluran (*junction*), dan sebagainya.



Ciri:

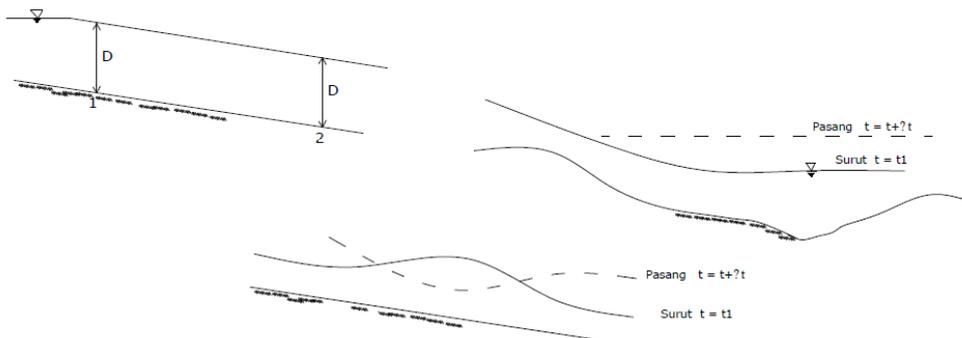
- Tekanan permukaan = tekanan atmosfer
- Aliran terjadi karena gravitasi  $\rightarrow f(S_0)$
- $S_0$  = saluran kemiringan dasar saluran = garis muka air



- Tekanan dalam pipa  $\neq$  tekanan atmosfer
- Aliran terjadi karena:
  - Perbedaan tekanan (beda elevasi muka air atau pompa)

Aliran:

1. Aliran permanen  $\frac{\partial D}{\partial t} = 0; \frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \dots \frac{\partial \dots}{\partial x} = 0$
2. Aliran tidak permanen  $\frac{\partial D}{\partial t} \neq 0; \frac{\partial Q}{\partial t} \neq 0 \dots \frac{\partial \dots}{\partial x} \neq 0$



Persamaan :

- Konservasi massa (kontinuitas)
- Konservasi momentum : St. Venant

$\frac{\partial}{\partial t} \neq 0$ ; secara analitis (numeris) sulit diselesaikan

Persamaan :

- Konservasi massa (kontinuitas)
- Konservasi momentum : St. Venant

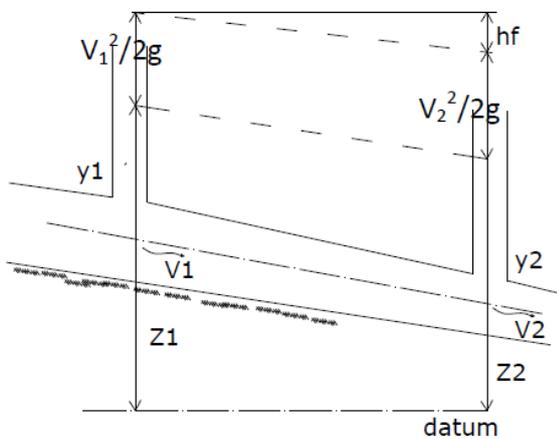
$\frac{\partial}{\partial t} \neq 0$ ; secara analitis (numeris) sulit diselesaikan

Saluran Terbuka (sungai)

- Variabel aliran tidak teratur (tampang lintang, kekasaran, kemiringan dasar, debit, kedalaman aliran dan lain-lain)

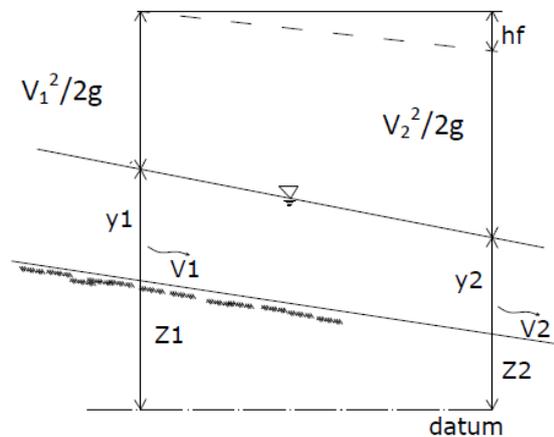
Saluran tertutup (pipa)

- Tampang lintang, kekasaran seragam



Aliran dalam pipa

Y = tinggi tekanan



Aliran saluran terbuka

Y = kedalaman air

### SOAL LATIHAN

1. Uraikan tahapan desain untuk pekerjaan normalisasi sungai?
2. Untuk perencanaan saluran sungai, apa saja yang menjadi perhatian utama?
3. Uraikan langkah penentuan dimensi efektif dan ekonomis jika di ketahui debit yang akan di alirkan adalah 120 m<sup>3</sup>/det dan lebar existing sungai adalah 60 m?
4. Uraikan dalam kondisi bagaimana terjadi aliran kritis dan sub kritis pada penampang sungai?

## BAB IX

### DRAG DAN LIFT

#### a. Pendahuluan

Pada bab ini kita akan meninjau berbagai aspek dari aliran yang melalui benda- benda yang terendam di dalam fluida. Contoh-contohnya mencakup aliran udara di sekitar pesawat terbang, mobil, dan gumpalan salju yang turun, atau aliran air di sekitar kapal selam dan ikan. Dalam situasi seperti ini benda- benda tersebut dikelilingi seluruhnya oleh fluida dan alirannya disebut sebagai *aliran luar*.

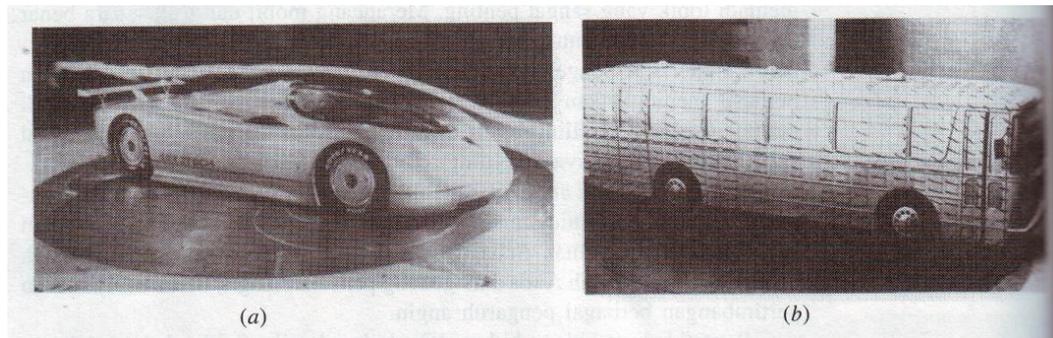
Aliran luar yang melibatkan udara sering disebut sebagai aerodinamika untuk menunjukkan arti penting dari aliran luar yang dihasilkan ketika sebuah obyek seperti sebuah pesawat terbang menjelajah atmosfer. Meskipun bidang kajian aliran luar aerodinamika ini sangat penting, masih banyak contoh- contoh lain yang juga sama pentingnya. Gaya fluida (gaya angkat (*lift*) dan gaya seret (*drag*)) pada permukaan kendaraan (mobil, truk, sepeda) telah menjadi topik yang sangat penting. Merancang mobil dan truk secara benar memungkinkan kita untuk mengurangi konsumsi bahan bakar dan meningkatkan karakteristik pengendalian kendaraan. Upaya-upaya yang serupa telah berhasil meningkatkan kualitas kapal-kapal, baik kapal yang bergerak di permukaan air (dikelilingi oleh dua fluida, udara dan air), maupun kapal selam (yang seluruhnya dikelilingi oleh air).

Aplikasi lain dari aliran luar melibatkan benda-benda yang tidak seluruhnya dikelilingi oleh fluida, meskipun benda-benda tersebut diletakkan dalam suatu bentuk aliran luar. sebagai contoh, perancangan yang tepat sebuah gedung (baik itu rumah Anda atau gedung pencakar langit) harus menyertakan pertimbangan berbagai pengaruh angin.

seperti halnya bidang-bidang lain dari mekanika fluida, dua pendekatan (teoretis dan eksperimental) digunakan untuk memperoleh informasi mengenai gaya-gaya fluida yang terbentuk oleh aliran luar. Teknik teoretis (meliputi kajian analitis dan numerik) dapat memberikan banyak informasi yang diperlukan mengenai aliran-aliran serupa itu. Namun demikian, karena kompleksitas persamaan pengaturannya dan kompleksitas dari bentuk geometrik benda yang terlibat, banyaknya informasi yang diperoleh secara teoretis murni sangat terbatas. Dengan kemajuan saat ini dan yang akan datang di bidang komputasi mekanika fluida, tampaknya prediksi komputer mengenai gaya-gaya dan pola aliran yang rumit akan dapat lebih cepat diperoleh.

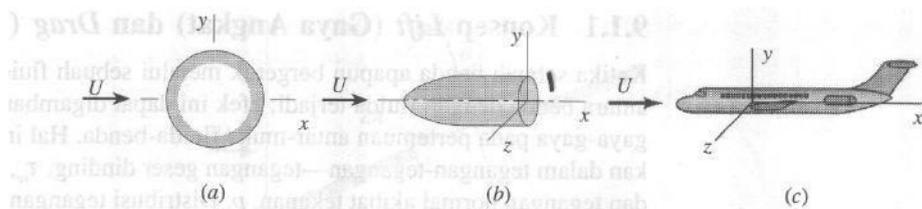
Kebanyakan informasi mengenai aliran luar berasal dari eksperimen- eksperimen yang

dilakukan, sebagian besarnya, pada model-model yang, diskala dari benda sebenarnya. Pengujian tersebut menggunakan pengujian terowongan angin dari model-model pesawat terbang, bangunan-bangunan dan bahkan seluruh kota. Dalam beberapa hal, justru benda sebenarnya bukannya model, yang diuji di terowongan angin. Gambar 3.4 menunjukkan pengujian kendaraan di dalam terowongan angin. Mobil, sepeda, dan berbagai objek lain yang performanya lebih baik telah dihasilkan dari pengujian di terowongan angin ini. Penggunaan terowongan air dan tangki *towing* juga memberikan informasi yang berguna mengenai aliran di sekitar kapal dan benda-benda lainnya.



**G A M B A R 9.1** (a) Aliran melewati sebuah mobil ukuran penuh di dalam terowongan angin laboratorium aerodinamika GM, dengan penampang uji berukuran 18 x 34 ft yang digerakkan oleh fan berdiameter 43 ft dan daya 4000 hp) (b) Aliran permukaan pada sebuah model kendaraan seperti yang diindikasikan oleh tuft yang dipasang pada permukaan.

Dalam bab ini kita akan meninjau karakteristik dari aliran luar yang melewati berbagai benda. Kita akan mengkaji aspek-aspek kualitatif dari aliran-aliran serupa itu dan mempelajari cara menentukan berbagai gaya pada benda yang dikelilingi oleh cairan. Sebuah benda yang terendam di dalam fluida yang bergerak mengalami gaya-gaya resultan akibat interaksi antara benda dengan fluida di sekelilingnya. Dalam beberapa situasi (seperti pesawat yang terbang melewati udara yang diam), fluida yang berada jauh dari benda berada dalam keadaan diam dan benda tersebut bergerak melalui fluida dengan kecepatan  $U$ . Dalam situasi lainnya (seperti angin yang bertiup melewati sebuah bangunan), benda dalam keadaan diam dan fluida mengalir melewati benda tersebut dengan kecepatan  $U$ . Pada kasus manapun, kita dapat menetapkan sistem koordinat pada benda



**Gambar 9.2 Klasifikasi aliran: (a) dua dimensi (b) simetri sumbu, (c) tiga dimensi**

dan memperlakukan situasi tersebut seperti fluida mengalir melewati benda yang diam dengan kecepatan  $U$ , yang disebut *kecepatan hulu*. Untuk keperluan buku ini, kita akan mengasumsikan bahwa kecepatan hulu konstan baik menurut waktu maupun tempatnya. Artinya, terdapat fluida dengan kecepatan seragam dan tetap yang mengalir melewati benda tersebut. Dalam situasi sesungguhnya, hal ini seringkali tidak benar. Sebagai contoh, angin yang mengalir melewati sebuah cerobong asap hampir selalu turbulen dan ber-gejolak (tidak tunak) dan mungkin kecepataannya tidak seragam dari atas sampai dasar cerobong. Biasanya ketidak-tunakan dan ketidakseragaman tidak begitu penting.

Bahkan dengan aliran hulu yang seragam dan tunak, aliran di sekitar benda dapat menjadi tak-tunak. Contoh perilaku seperti ini mencakup gerak periodik secara cepat (*flutter*) dalam aliran yang melewati airfoil (sayap), osilasi beraturan dari kabel telepon yang "bernyanyi" akibat tiupan angin, dan fluktuasi turbulen yang tidak beraturan di daerah olakan (*wake*) di belakang benda.

Struktur dari aliran luar dan tingkat kemudahan di mana aliran dapat digambar dan dianalisa sering tergantung pada sifat alamiah dari benda di dalam aliran. Tiga kategori umum dari benda ditunjukkan pada Gambar 9.5. Termasuk di dalamnya adalah (a) benda dua-dimensi (panjang tak terhingga dengan bentuk dan ukuran penampangnya yang konstan), (b) benda simetris sumbu (terbentuk dengan merotasi bentuk penampangnya terhadap sumbu simetrinya), dan (c) benda tiga-dimensi yang mungkin memiliki atau tidak memiliki sebuah garis atau bidang simetri. Dalam prakteknya tidak terdapat benda-benda yang benar-benar dua-dimensi tidak ada yang memiliki panjang tak terhingga. Namun demikian, banyak benda yang cukup panjang sehingga efek-efek ujungnya sedemikian kecil dan dapat diabaikan.

Klasifikasi lain dari bentuk benda dapat tergantung pada apakah benda tersebut dibuat mulus mengikuti garis arus (*streamlined*) atau tumpul. Karakteristik aliran sangat tergantung pada seberapa banyak bagian yang dibuat mulus tersebut. Secara umum, *benda-benda streamlined* (seperti airfoil, mobil balap, dan lain-lain.) memiliki pengaruh kecil pada fluida yang mengelilinginya, dibandingkan dengan pengaruh yang dimiliki *benda tumpul* (misalnya,

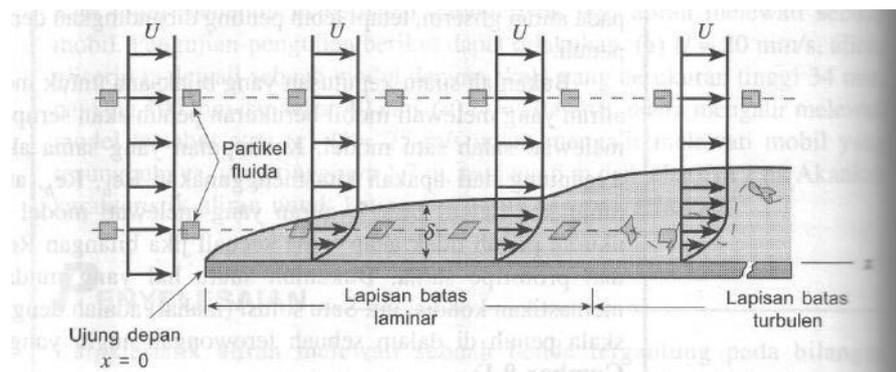
parasut, gedung-gedung, dan lain-lain.) pada fluida. Biasanya, tapi tidak selalu, akan lebih mudah untuk mendorong sebuah *benda streamlined* melewati suatu fluida daripada mendorong sebuah benda tumpul yang ukurannya sama agar bergerak dengan kecepatan yang sama. Terdapat beberapa pengecualian penting untuk aturan dasar ini.

### Struktur dan Ketebalan Lapisan Batas pada Sebuah Pelat Datar

Terdapat banyak ragam ukuran sebuah lapisan batas dan struktur dari aliran di dalamnya. Sebagian dari variasi ini disebabkan oleh bentuk benda dimana lapisan batas tersebut terbentuk. Dalam subbab ini kita akan meninjau situasi yang paling sederhana, yaitu situasi di mana lapisan batas terbentuk pada sebuah pelat datar dengan panjang tak terhingga yang di sepanjangnya mengalir suatu fluida viskos, tak mampu-mampat seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 9.1. Jika permukaannya melengkung (misalnya sebuah silinder bundar atau airfoil), struktur lapisan batas akan lebih rumit.

Jika bilangan Reynolds cukup besar, hanya fluida di dalam lapisan batas relatif tipis pada pelat yang akan merasakan efek dari pelat. Artinya, kecuali di daerah dekat pelat, kecepatan aliran pada dasarnya akan sebesar  $V = U$ , yaitu kecepatan hulu. Untuk pelat datar dengan panjang tak terhingga yang membentang dari  $x = 0$  sampai  $x = \infty$ , tidaklah jelas bagaimana mendefinisikan bilangan Reynolds karena tidak ada panjang karakteristik. Pelat tidak memiliki ketebalan dan panjangnya tidak terbatas.

Untuk pelat dengan panjang tertentu, jelas bahwa panjang pelat  $\ell$ , dapat digunakan sebagai panjang karakteristik. Untuk pelat dengan panjang tak terhingga.



**Gambar 9.3. Distorsi dari partikel fluida ketika mengalir didalam lapisan batas**

### Konsep lift (gaya angkat) dan drag (gaya seret)

Ketika sebuah benda apapun bergerak melalui sebuah fluida, suatu interaksi antara benda

dengan fluida terjadi; efek ini dapat digambarkan dalam bentuk gaya-gaya pada pertemuan antar-muka fluida-benda. Hal ini dapat digambarkan dalam tegangan-tegangan, tegangan geser dinding,  $\tau_w$ , akibat efek viskositas dan tegangan normal akibat tekanan,  $p$ . Distribusi tegangan geser dan tekanan yang biasa ditunjukkan pada Gambar 9.4. Baik  $\tau_w$  dan  $p$  bervariasi besar dan arahnya di sepanjang permukaan.

Seringkali berguna jika kita mengetahui distribusi terperinci dari tegangan geser dan tekanan di seluruh permukaan benda, meskipun informasi serupa itu sulit didapatkan. Namun demikian, seringkali yang diperlukan hanya efek resultan secara keseluruhan. Gaya resultan dalam arah yang sama dengan kecepatan hulu disebut sebagai *drag* (gaya seret),  $D$ , dan gaya resultan yang tegak lurus terhadap arah kecepatan hulu disebut sebagai *lift* (gaya angkat),  $L$ , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.4c. Untuk beberapa benda tiga dimensi, mungkin juga terdapat sebuah gaya samping yang tegak lurus terhadap bidang yang memuat  $D$  dan  $L$ .

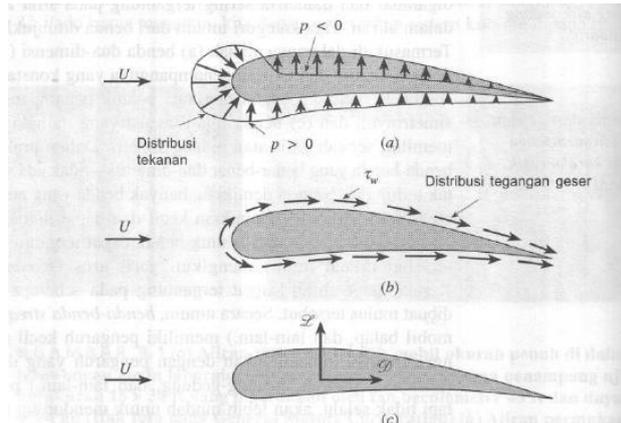
Resultan dari tegangan geser dan distribusi tekanan dapat diperoleh dengan mengintegrasikan pengaruh-pengaruh dari kedua besaran ini pada permukaan benda seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 9.4. Komponen  $x$  dan  $y$  dari gaya fluida pada elemen luas kecil sebesar  $dA$  adalah

$$dF_x = (p \, dA) \cos \theta + (\tau_w \, dA) \sin \theta$$

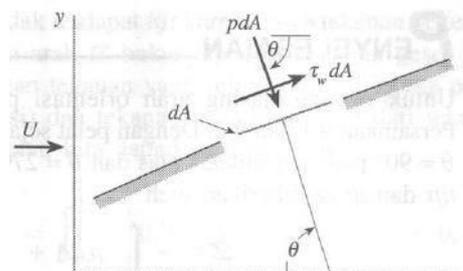
dan

$$dF_y = -(p \, dA) \sin \theta + (\tau_w \, dA) \cos \theta$$

Jadi, komponen  $x$  dan  $y$  netto dari gaya pada benda adalah:



**Gambar 9.4. Gaya-gaya dari fluida di sekeliling pada sebuah benda dua dimensi: (a) gaya tekanan, (b) gaya viskos, (c) gaya resultan (lift dan drag)**



**Gambar 9.5. Gaya tekanan dan gaya geser**

$$D = \int dF_x = \int p \cos \theta dA + \int \tau_w \sin \theta dA$$

$$L = \int dF_y = - \int p \sin \theta dA + \int \tau_w \cos \theta dA$$

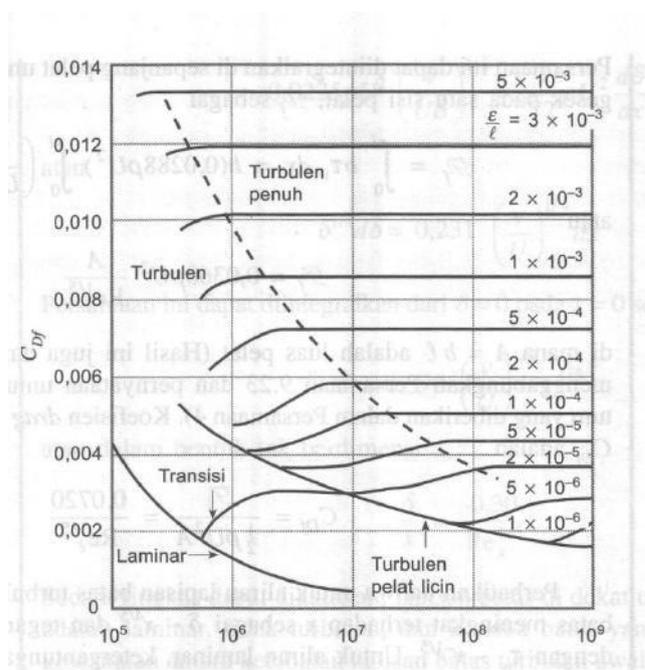
Tentu saja untuk melakukan pengintegralan dan menentukan *lift* dan *drag*, kita harus mengetahui bentuk benda (yaitu,  $\theta$  sebagai suatu fungsi dari lokasi di sepanjang benda) dan distribusi dari  $\tau_w$  dan  $p$  di sepanjang permukaan. Distribusi-distribusi ini seringkali sangat sulit didapatkan, baik secara eksperimental maupun secara teoretis. Distribusi tekanan dapat diperoleh secara eksperimental tanpa banyak kesulitan dengan menggunakan serangkaian tap tekanan statik sepanjang permukaan benda. Di sisi lain, biasanya sangat sulit untuk mengukur distribusi tegangan geser dinding.

#### **b. Gaya seret (drag)**

Seperti yang telah dibahas diatas, setiap benda yang bergerak melalui suatu fluida akan mengalami drag,  $D$  suatu gaya netto dalam arah aliran karena tekanan dan gaya geser pada permukaan benda. Gaya netto ini yang merupakan kombinasi komponen gaya pada arah aliran

dari gaya-gaya, normal dan tangensial pada benda, dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan dibawah, jika distribusi tekanan,  $p$ , dan tegangan geser dinding  $\tau_w$  diketahui. Hanya pada kasus-kasus tertentu (sangat jarang) distribusi-distribusi ini dapat ditentukan secara analitis. Aliran lapisan batas yang lewati sebuah pelat datar sejajar dengan aliran hulu seperti yang dib dalam Subbab b adalah salah satu contoh kasusnya. Kemajuan saat dalam bidang komputasi dinamika fluida (yaitu dengan menggunakan komputer untuk memecahkan persamaan-persamaan pengatur pada medan aliran) telah memberikan hasil-hasil yang menjanjikan untuk bentuk-bentuk yang lebih kompleks. Namun demikian, masih banyak usaha yang harus dilakukan di bidang ini.

Sebagian besar informasi yang tersedia mengenai drag pada sebuah, benda adalah hasil dari eksperimen yang banyak sekali dilakukan dengan terowongan angin, terowongan air, tangki towing, dan peralatan-peralatan lainnya yang digunakan untuk mengukur drag model-model yang diskala.



**Gambar 9.5 Koefisien drag gesek untuk sebuah pelat datar**

**Tabel 9.1 Persamaan Empiris untuk Koefisien Drag**

<b>Pelat datar</b>	<b>Persamaan</b>	<b>Kondisi aliran</b>
	$C_{Df} = 1,328/(Re_\ell)^{0,5}$	Aliran laminar
	$C_{Df} = 0,455/(\text{Log } Re_\ell)^{2,58} - 1700/Re_\ell$	Transisional dengan $Re_{xcr} = 5 \times 10^5$
	$C_{Df} = 0,455/(\text{Log } Re_\ell)^{2,58}$	Turbulen, pelat licin
	$C_{Df} = [1,89 - 1,62 \text{ Log } \epsilon l \ell]^{-2,5}$	Turbulen penuh

## **BAB X**

### **POMPA DAN COMPRESSOR**

**Pompa** : Mesin fluida yang digunakan untuk memindahkan fluida dari satu tempat ke tempat lain. Dalam menjalankan fungsinya tersebut, pompa mengubah energi gerak poros untuk menggerakkan sudu-sudu menjadi energi tekanan pada fluida.

**Kompresor** : suatu peralatan mekanik yang digunakan untuk menambah energi kepada fluida gas / udara sehingga fluida tersebut dapat mengalir dari suatu tempat ke tempat lainnya secara berlanjut.

#### **Jenis – Jenis katup / Valve**

- Regenerative Valve :
- Pressure Reducing Valve : berfungsi mengurangi tekanan hingga hilir dari katup
- Relief Valve: untuk mengendalikan atau membatasi tekanan dalam sebuah sistem yang dapat merusak peralatan, kegagalan peralatan, atau kebakaran.
- Safety valve : beroperasi secara otomatis pada tekanan yang berbeda untuk memperbaiki situasi berbahaya, biasanya karena over-tekanan.
- Counter balance valve : Katub seimbangan, yang berfungsi untuk mengendalikan aliran utama dan sebagai resistansi hidrolik

#### **Jenis – Jenis Pompa**

##### **a. Non Positive Displacement**

- Aliran Fluida dihasilkan oleh impeller/blade/ sudu yang berputar.
- Tidak lazim digunakan pada aplikasi sistem hidrolik, karena aliran fluida akan mengalami slippage.

Internal slippage : adanya aliran berbalik dari outlet pompa menuju inlet pompa sehingga aliran outlet akan mengalami pengurangan pada debitnya.

Pompa yang termasuk dalam kategori Non positive displacement adalah :

> Pompa Sentrifugal : Fluida yang keluar dari pompa arahnya tegak lurus dengan fluida yang masuk pompa

> Pompa Aksial : Fluida yang keluar dari pompa arahnya sejajar dengan fluida yang masuk pompa.

##### **b. Positive Displacement**

- Pompa hidrolik menggunakan jenis pompa Positive displacement karena tidak ada internal slippage yang terjadi

- Displacement : Jumlah aliran/Debit fluida yang dihasilkan/dikeluarkan pompa pada setiap putaran poros penggerak.
- Pompa yang termasuk jenis Positive Displacement : Simple Vane Pump, Variable Delivery Vane Pump, Radial Piston Pump, Gear Pump.

### **Mesin Bantu pada kapal**

- **Kompresor Udara / Air Compressor.** Fungsinya untuk menghidupkan motor diesel / mesin Bantu karena pada umumnya mesin tersebut hanya dapat dihidupkan dengan menggunakan tenaga / tekanan udara.
- **Pompa air pendingin / Cooling water pump** Terdapat 2 jenis yaitu, pompa air tawar pendingin (tertutup) adalah pompa yang mensirkulasikan air tawar pendingin dari motor ke cooler untuk selanjutnya kembali ke motor, sedangkan pompa air laut pendingin (terbuka) adalah pompa yang memasukan air laut ke dalam cooler yang selanjutnya mengalir kembali ke laut.
- **Pompa ballast / Ballast pump** Pompa air laut yang digunakan untuk memompa air laut ke dalam / ke laur tangki – tangki ballast.
- **Pompa Sanitary / Sanitair pump** Pompa air laut / tawar untuk mencukupi kebutuhan air tawar bagi air pendingin mesin – mesin, serta kebutuhan lainnya seperti dapur, kamar mandi, WC dsb.
- **Pompa Got / Bilge pump** Untuk menampung air kondesat / air got yang kemudian di buang keluar kapal.
- **Pompa Dinas Umum.** Pompa yang digunakan untuk menggantikan fungsi pompa air laut pendingin, pompa ballast atau pompa got.
- **Pompa Transfer bahan bakar.** Digunakan untuk memindahkan bahan bakar dari tangki ke tangki lainnya dan untuk persiapan bunker dan untuk pengaturan stabilitas kapal.
- **Separator**  
Ada 2 jenis yaitu, purifier untuk memisahkan air dengan minyak dan clarifier untuk memisahkan benda lainnya yang terbawa dalam minyak.
- **Ketel Bantu / DonkeyBoiler.** Digunakan untuk menghasilkan uap air untuk memanaskan bahan bakar sebelum masuk kedalam motor diesel. Uap tersebut dapat dipergunakan untuk memasak, pemanas air mandi dan pemanas untuk air condition.
- **Mesin Kemudi.** Untuk menggerakkan daun kemudi ke kiri / kanan atau untuk mempertahankannya pada posisi yang diinginkan.

- **Mesin Jangkar** Winch / Derek jangkar digunakan untuk menaikkan / heave up jangkar sewaktu kapal akan berlayar.
- **Winch / Derek untuk alat B/M** Berfungsi untuk alat bongkar muat kapal sewaktu kapal sandar di dermaga.

### **Sistem Hidrolik dan Pneumatik**

**Hidrolik** : sistem pemindahan dan pengontrolan gaya dan gerakan dengan fluida cair dalam hal ini oli.

#### **Kerugian system Hidrolik :**

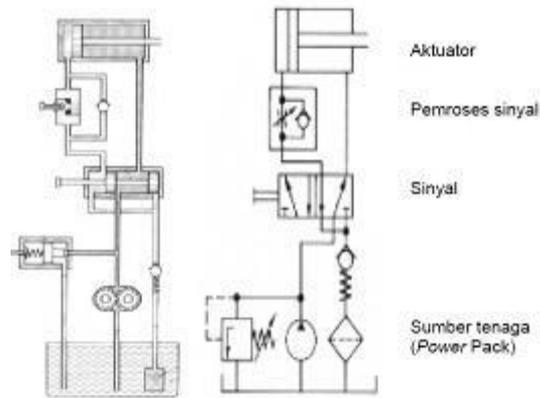
- Fluida yang digunakan (oli) harganya mahal.
- Apabila terjadi kebocoran akan mengotori sistem, sehingga sistem hidrolik jarang digunakan pada industri makanan maupun obat-obatan.

#### **Kelebihan Sistem Hidrolik :**

- Tenaga yang dihasilkan sistem hidrolik besar sehingga banyak diaplikasikan pada alat berat seperti crane, kerek hidrolik dll.
- Oli juga bersifat sebagai pelumas sehingga tingkat kebocoran lebih jarang dibandingkan dengan sistem pneumatik.
- Tidak berisik.

#### **Sifat Minyak Hidrolik :**

- Kekentalan (Viskositas) yang cukup
- Indeks Viskositas yang baik
- Tahan api (tidak mudah terbakar)
- Tidak berbusa (Foaming)
- Tahan dingin
- Tahan korosi dan tahan aus
- Demulsibility (Water separable)
- Minimal compressibility



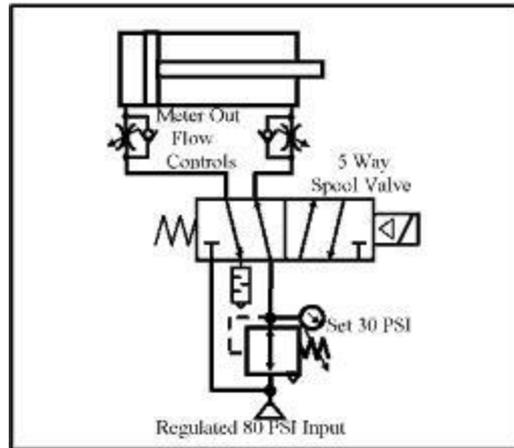
**Pneumatik** : Semua sistem yang menggunakan tenaga yang disimpan dalam bentuk udara yang dimampatkan untuk menghasilkan suatu kerja.

**Kekurangan Sistem Pneumatik :**

- Memerlukan instalasi penghasil udara bertekanan (kompresor).
- Mudah terjadi kebocoran.
- Menimbulkan suara bising.
- Udara yang bertekanan mudah mengembun, sehingga sebelum memasuki sistem harus diolah terlebih dahulu agar memenuhi persyaratan tertentu, misal kering, memiliki tekanan yang cukup, dan mengandung sedikit pelumas agar mengurangi gesekan pada katup-katup dan aktuator.

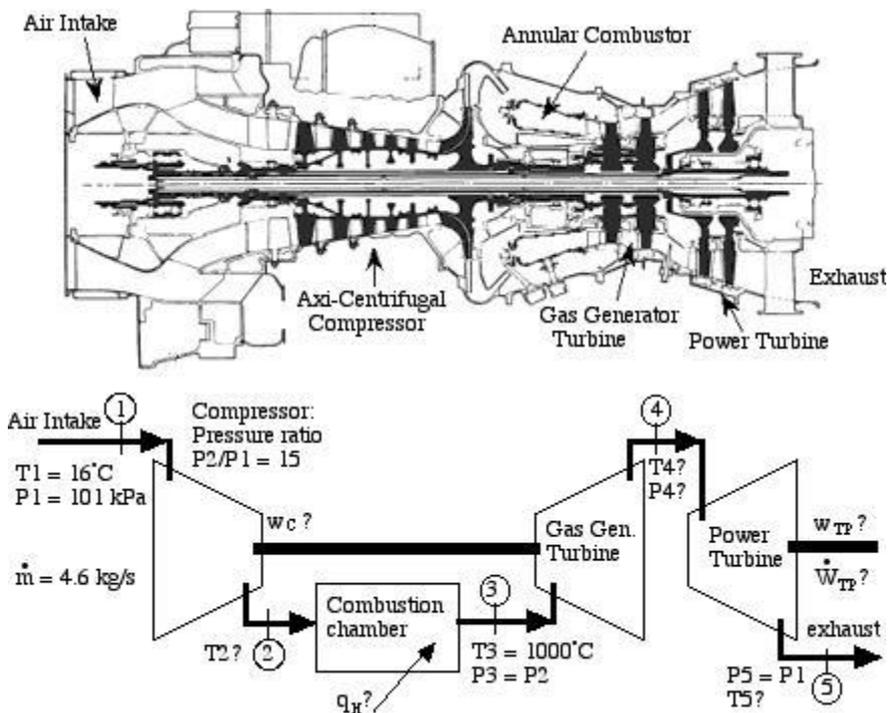
**Kelebihan Sistem Pneumatik :**

- Fluida yang digunakan merupakan udara yang memiliki ketersediaan yang tak terbatas di alam.
- Udara mudah disalurkan dari suatu tempat ke tempat lain.
- Udara dapat fleksibel digunakan pada berbagai temperatur yang diperlukan.
- Aman.
- Udara yang ada di sekitar kita cenderung bersih tanpa zat kimia yang berbahaya.
- Kecepatan dan daya dorong yang mudah diatur.
- Udara mudah disimpan di tabung.
- Udara memiliki banyak manfaat serta mudah dimanfaatkan.



## Turbin

Turbin adalah rotary engine (mesin yang berotasi) yang dapat mengekstrak energy dari aliran fluida.



Turbin memiliki 2 mekanisme dasar dalam menghasilkan energy dari fluida ini :

- **Turbin Impuls** : Turbin jenis ini mengubah dari fluida dengan kecepatan tinggi. Impulse total akan memutar turbin. Fluida tidak mengalami perubahan tekanan pada saat berinteraksi dengan turbin blade. Sebelum mencapai turbin, energy tekanan diubah ke velocity head dengan cara mempercepat gerakan fluida melalui nozzle.

- **Turbin Reaksi** : Turbin ini menghasilkan torsi dengan cara mereaksikan tekanan (pressure) fluida kerja. Pada jenis ini, tekanan fluida berubah seketika melewati turbin blade.

Klasifikasi Turbin :

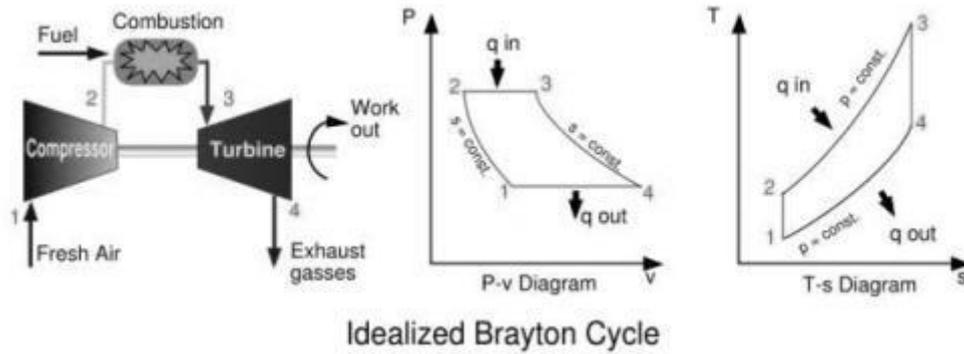
- **Turbin Uap** : Kebanyakan digunakan sebagai penggerak generator untuk menghasilkan listrik di power plant (power plant yang menggunakan batubara, minyak, dan tenaga listrik). Turbin ini juga untuk menggerakkan propeller kapal.
- **Turbin Gas** : Turbin yang mengubah energy kimia hidrokarbon yang dikandung bahan bakar gas ( dengan komponen utamanya : methane CH<sub>4</sub>, ethane, propane, dst) yang direaksikan dengan oksigen menjadi energy mekanik. Produk reaksi antara hidrokarbon dan oksigen adalah H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, dan panas. Reaksi ini tergolong kedalam reaksi eksotermis karena menghasilkan panas. Gas hasil reaksi inilah yang sangat potensial untuk diubah menjadi energy mekanik. Terdiri dari saluran inlet, fan, compressor, combustor, dan nozzle.
- **Turbin Transonik** : Seperti turbin gas, namun mempunyai aliran fluida yang supersonic ketika keluar dari nozzle guide vanes. Turbin ini beroperasi dengan pressure ratio yang lebih tinggi dibanding turbin gas namun mempunyai efisiensi yang lebih rendah.

Penampang Melintang Turbin Gas

Secara garis besar, turbin gas mempunyai tiga bagian penting :

- **Compressor** : berfungsi menarik udara ke mesin, menaikkan tekanannya, kemudian mengirimkan pressurized air tersebut ke ruang pembakaran (Combustion chamber).
- **Sistem Pembakaran (Combustion System)** : ruang pembakaran menerima udara dari compressor yang kemudian dicampur dengan bahan bakar yang disemprotkan nozzle di depan ruang pembakaran. Campuran ini kemudian dibakar pada temperature yang dapat mencapai 1000 C untuk menghasilkan energy panas yang maksimum yang dipicu oleh percikan dari busi diruang terisolasi dan terus menerus.
- **Turbin** : Mengekstrak energy dari gas panas yang keluar dari combustion chamber untuk menggerakkan compressor.

Siklus Thermodinamika Turbin gas



Fenomena- Fenomena pada Turbin Gas

**a. Vibrasi**

Vibrasi adalah benda yang berisolasi. Sedangkan vibrasi mesin adalah gerakan maju mundur (back-forth) yang terjadi pada mesin atau komponen mesin. Penyebab terjadinya adalah :

1. Gaya yang berulang (repeating force)

Gaya berulang diakibatkan :

- Putaran yang tidak seimbang
- Misalligned : kondisi dimana dua pertemuan shaft tidak segaris.
- Worn : gear, bearing yang kurang baik atau rusak
- Komponen driven machine yang tidak cocok

2. Kerugian (looseness) Terjadi akibat clearance bantalan (bearing) yang berlebih dan mounting bolt tidak terpasang sempurna.

3. Resonansi

**2. Surging**

Surging adalah titik dimana tekanan output terlalu besar jika dibandingkan dengan jumlah aliran yang melewati compressor. Ini menunjukkan kondisi operasi tidak stabil.

**7. Pressure Drop**

Pressure Drop adalah kerugian atau penurunan tekanan dari satu titik di dalam pipa atau tabung."Kerugian Tekanan" adalah hasil dari gaya gesek pada fluida seperti yang mengalir melalui tabung.. Gaya gesek disebabkan oleh resistansi terhadap aliran.. Faktor utama yang mempengaruhi resistensi terhadap aliran fluida adalah kecepatan fluida melalui pipa dan viskositas fluida.

## SOAL LATIHAN

1. Sebutkan dan jelaskan apa yang dimaksud dengan pompa dan kompresor!
2. Sebuah kompresor digunakan untuk menghasilkan udara mampat pada sebuah instalasi industri. Pompa menghasilkan tekanan akhir sebesar 3 atm dan debit udara masuk kompresor sebesar 7200 m<sup>3</sup> /menit. Hitunglah besarnya daya kompresor! Hitung pula daya poros apabila efisiensi kompresor 80%!
3. Apa yang dimaksud dengan turbin ? Terangkan dengan ringkas penggunaan turbin !
4. Tuliskan secara ringkas klasifikasi dari turbin hidrolik !
5. Terangkan perbedaan secara jelas antara turbin aliran radial & turbin aliran aksial !

## MINI PROJECT

Mini project merupakan sebuah tugas besar yang dikerjakan oleh mahasiswa secara berkelompok.

Adapun beberapa ketentuan dalam pembuatan Mini Project:

1. Mini project adalah merancang dan menganalisis sebuah sistem peralatan (peralatan industri, laboratorium, atau peralatan rumah tangga) yang mengaplikasikan konsep-konsep dasar dari mekanika fluida (beberapa contoh persoalan yang bisa diangkat menjadi judul mini project: desain dan analisis pesawat terbang, kapal, kapal selam, roket, mesin jet, turbin angin, perangkat biomedis, pendinginan komponen elektronik, dan transportasi air, minyak mentah, dan gas alam dll)
2. Laporan Mini Project dibuat minimal 10 halaman dengan format yang telah ditentukan. Silahkan unduh [template laporan mini project](#) dibawah ini. Laporan dikumpulkan paling lambat pada minggu ke 10 setelah pelaksanaan UTS dilakukan.

**TEMPLATE LAPORAN MINI PROJECT  
MATA KULIAH MEKANIKA FLUIDA**

**MSN1.62.2011**



**Judul :**

.....

.....

**Kelompok:**

No	Nama	NIM
1		
2		

**PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN  
UNIVERSITAS NEGERI PADANG  
2022**

## DAFTAR ISI

Ringkasan .....	123
1. Pendahuluan .....	124
1.1. Latar Belakang.....	124
1.2. Jenis-jenis peralatan yang ditemui di pasaran.....	124
2. Kajian teori .....	125
2.1. Konsep Dasar .....	125
2.2. Prinsip Kerja Alat.....	125
2.3. Persamaan matematis .....	125
3. Rancangan Alat .....	126
3.1. Gambar Disain Alat .....	126
3.2. Cara Kerja Alat yang dibuat.....	126
3.3. Saran untuk peningkatan kinerja dan efisiensi.....	126
4. Kesimpulan dan Saran.....	127
4.1. Kesimpulan.....	127
4.2. Manfaat bagi masyarakat .....	127
Daftar Pustaka.....	128

## Ringkasan

Ringkasan (berisi maksimal 300 Kata). Yang berisi ringkasan dari apa yang dibuat/dianalisis

# 1. Pendahuluan

Pendahuluan. (berisi 500 s/d 600 kata) Pendahuluan berisi latar belakang kenapa alat ini menjadi sesuatu yang penting untuk dianalisis. Ceritakan juga pada bagian pendahuluan latar belakang masalah yang dibahas dan jenis-jenis peralatan yang ada di pasaran.

## 1.1. Latar Belakang

.....

## 1.2. Jenis-jenis peralatan yang ditemui di pasaran

.....

## 2. Kajian teori

Kajian Teori (berisi 600 s/d 800 kata). Kajian teori berisi konsep dasar dan cara kerja peralatan yang akan dianalisis. Silahkan dijelaskan persamaan-persamaan dasar yang menjadi dasar perhitungan kinerja / kerja alat dimaksud.

### 2.1. Konsep Dasar

.....

### 2.2. Prinsip Kerja Alat

.....

### 2.3. Persamaan matematis

.....

### 3. Rancangan Alat

Rancangan Alat (berisi 500 s/d 800 kata). Pada bagian ini silahkan dijelaskan rancangan alat yang dibuat/dianalisis disertai dengan gambar kerja yang dibuat menggunakan solidwork. Pada bagian ini silahkan dijelaskan saran dan masukan anda agar kinerja dan efisiensi alat dapat ditingkatkan.

#### 3.1. Gambar Disain Alat

.....

#### 3.2. Cara Kerja Alat yang dibuat

.....

#### 3.3. Saran untuk peningkatan kinerja dan efisiensi

.....

## 4. Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan dan Saran (berisi 150 s/d 250 kata). Silahkan jelaskan manfaat yang diperoleh dari pembuatan / analisis alat untuk masyarakat luas.

### 4.1. Kesimpulan

.....

### 4.2. Manfaat bagi masyarakat

.....

# Daftar Pustaka

1. .... dst

## Deskripsi Tingkat penilaian

	<b>Excellent</b>	<b>Good</b>	<b>Satisfy</b>	<b>Fail</b>
Deskripsi	Mampu mendeskripsikan dengan benar dan lengkap	Mampu mendeskripsikan dengan benar tapi kurang lengkap	Mampu mendeskripsikan tapi kurang jelas dan kurang lengkap	Tidak mampu mendeskripsikan
Formulasi	Mampu memformulasikan dengan benar dan lengkap	Mampu memformulasikan dengan benar tapi kurang lengkap	Mampu memformulasikan tapi kurang jelas dan kurang lengkap	Tidak mampu memformulasikan
Menghitung	Mampu menghitung dengan benar dan lengkap	Mampu menghitung dengan benar tapi kurang lengkap	Mampu menghitung tapi kurang jelas dan kurang lengkap	Tidak mampu menghitung
Analisis	Mampu menganalisis dengan benar dan lengkap	Mampu menganalisis dengan benar tapi kurang lengkap	Mampu menganalisis tapi kurang jelas dan kurang lengkap	Tidak mampu menganalisis

## Sistem Penilaian

Nilai Angka	Nilai Mutu	Angka Mutu	Sebutan Mutu	Nilai Angka	Nilai Mutu	Angka Mutu	Sebutan Mutu
85 – 100	A	4.0	Dengan pujian	55 – 59	C	2.0	Cukup
80 – 84	A-	3.6	Sangat baik sekali	50 – 54	C-	1.6	Kurang cukup
75 – 79	B+	3.3	Baik sekali	40 – 49	D	1.0	Kurang
70 – 74	B	3.0	Baik	≤ 39	E	0.0	Gagal
65 – 69	B-	2.6	Cukup Baik	-	T	-	Tertunda
60 – 64	C+	2.3	Lebih dari cukup				