

FLUIDA

**ANDI SURYANTO
SYAMSUL BAKHRI**



FLUIDA

ANDI SURYANTO

SYAMSUL BAKHRI

FLUIDA

FLUIDA

© ANDI SURYANTO
SYAMSUL BAKHRI

Editor : Team WADE Publish
Layout : Team WADE Publish
Design Cover : Team WADE Publish
Sumber Gambar: <https://www.freepik.com/>

Diterbitkan oleh:



Anggota IKAPI 182/JTI/2017

Cetakan Pertama, Januari 2023
ISBN: 978-623-6243-33-6

Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronis maupun mekanis, termasuk memfotocopy, merekam atau dengan sistem penyimpanan lainnya, tanpa seizin tertulis dari Penerbit.

Perpustakaan Nasional: Katalog Dalam Terbitan (KDT)
Viii+160 hlm; 15x23 cm

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	v
KATA PENGANTAR	vii
BAB I	
FILOSOFI MEKANIKA FLUIDA	1
1. Prinsip Dasar Fluida	14
2. Dimensi Dan Satuan	19
BAB II	
FLUIDA STATIS	21
1. Filosofi Fluida Statis	22
2. Arah Gaya	35
3. Bentuk Permukaan Fluida Statis	36
4. Massa Jenis	38
5. Modulus Bulk dan Kompresibilitas	40
6. NTekanan Hidrostatik	42
7. Ketinggian Permukaan Fluida	47
8. Hukum Pascal	57
9. Barometer	62
10. Gaya Angkat Archimedes	64
11. Tenggelam, Melayang, dan Terapung	68
12. Tegangan Permukaan	75
13. Kelengkungan Permukaan Fluida	77
14. Kohesi Dan Adhesi	79
15. Tekanan Yang Dilakukan Gas	81
16. Presto	83
17. Menghitung Luas Patung Arung Palakka (Putra Terbaik Bugis)	86
18. Infus	90
19. Tekanan Dalam Kabin Pesawat	91
20. Terusan Panama	94

BAB III

FLUIDA DINAMIS	99
1. Definisi Garis Arus	108
2. Laju Aliran Fluida.....	110
3. Debit Aliran	111
4. Persamaan Kontinuitas.....	112
5. Aliran Laminer Dan Turbulen.....	119
6. Hukum Bernoulli	120
7. Aplikasi Hukum Bernoulli.....	122
8. Viskositas	135
9. Persamaan Poiseuille	137
10. Hukum Stokes.....	139
11. Bilangan Reynolds	141
12. Gesekan Udara	142
13. Topik Khusus	144
LATIHAN SOAL	152
DAFTAR PUSTAKA.....	157
PROFIL PENULIS	159

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah berkat Rahmat Allah SWT, penulis mempersembahkan sebuah buku dengan judul “FLUIDA”. Buku disusun untuk digunakan sebagai referensi dalam rangka menambah wawasan dan pengetahuan yang sangat penting dalam membantu memahami perilaku material yang diharapkan dapat mendukung aktifitas keseharian umat manusia. Mekanisme fluida sebagai fenomena alam yang menggambarkan suatu material dapat mengalir sesuai sifat dan wujudnya. Memahami fluida, Insya Allah akan mudah memahami fenomena alam dan akan meningkatkan rasa syukur atas kenikmatan yang diberikan oleh Sang Pencipta seluruh alam, yaitu ALLAH Subhana Wataala.

Buku ini sangat bermanfaat bagi siapa saja yang ingin mengetahui lebih mendalam tentang Fluida, bahkan dapat menjadi pegangan dalam Merancang dan Membangun Instalasi Fluida pada Objek Perumahan, Industri dan Obyek Pekerjaan lainnya.

Ucapan terima kasih kami haturkan kepada Penerbit Wade Group yang telah membantu pengeditan dan penerbitan buku ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan buku ini masih banyak lubang yang terliang dan masih banyak rongga yang terengah. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran demi kesempurnaan buku ini.

Penulis

BAB I

FILOSOFI MEKANIKA FLUIDA

Alam semesta ini terdapat sebuah ketentuan yang sangat religius, yaitu sistem dan lingkungan. Berbagai bentuk pendefinisian sistem dan lingkungan di berbagai disiplin ilmu, membuat berbagai konteks yang berbeda pula. Namun hal tersebut tidak memengaruhi adanya ketidakstabilan tujuan dalam pendefinisian ilmu tersebut, yaitu kepercayaan akan adanya Tuhan.

Alam merupakan suatu tempat atau wadah yang dimiliki oleh Tuhan. Di sinilah sebuah sistem utama ada yaitu alam semesta. Alam semesta merupakan sistem terluas yang di dalamnya ada sistem-sistem yang lebih kecil untuk mendukung keberlangsungan alam semesta itu sendiri. Sistem sendiri merupakan sekumpulan elemen yang mempunyai tujuan yang sama. Jadi, di dalam sistem tersebut ada elemen yang merupakan penyusun akan adanya sistem tersebut.

Alam semesta yang begitu luas ini, bisa ditafsirkan dalam *Hukum Dasar Fisika* yang merupakan suatu *tools* untuk menyelesaikan berbagai kerumitan alam semesta ini. Di sinilah, salah satu ilmu dasar Fisika adalah ilmu analisis aliran fluida atau biasa disebut *Mekanika Fluida*. Mekanika Fluida merupakan suatu ilmu yang dasarnya mempelajari aliran fluida dengan memperhatikan tiga keseimbangan, yaitu, Keseimbangan Massa, Keseimbangan Momentum, dan Keseimbangan Energi.

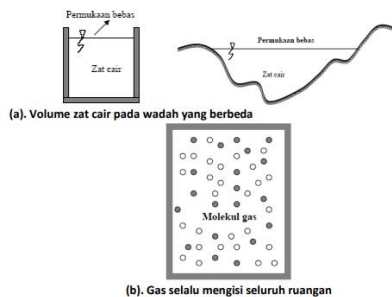
Untuk memudahkan penyelesaian dan penulisan untuk berbagai keadaan dan permasalahan Mekanika Fluida, digunakan *Model Matematis*. Model Matematis paling mendasar dalam Mekanika Fluida menggunakan *Persamaan Differensial Parsial*, seperti *Persamaan Navier-Stokes*, *Persamaan Kontinuitas*, dsb. Setelah mendapatkan persamaan dalam analisis aliran

fluida, maka yang harus dilaksanakan adalah memecahkan masalah atau mencari solusi (*Problem Solving*) atas permasalahan tersebut. Dalam menyelesaikan masalah yang sangat rumit dan tidak mungkin dipecahkan dengan kalkulus elementer, kita akan menggunakan sebuah metode yang dikenal sebagai Pendekatan Numerik. Pendekatan Numerik merupakan sebuah skema yang menggabungkan beberapa persamaan aljabar. Dalam memecahkan permasalahan numerik, beberapa contoh metode yang kita dapat gunakan adalah *Metode Finite Volume* dan *Metode Finite Element*. Oleh karena itu sebuah pemecahan masalah dengan menggunakan Komputer (melalui *Brainware* dan *Hardware*) adalah sangat memungkinkan dalam menghitung persamaan dan model tingkat tinggi, seperti dalam menyelesaikan masalah aliran fluida dalam *Heat Transfer*.

Mekanika adalah cabang ilmu yang menelaah hal-hal yang berkaitan dengan gaya dan gerakan. Sedangkan Fluida sendiri memiliki definisi, yaitu zat yang dapat mengalir atau umumnya dibahasakan sebagai zat alir. Menurut *Raswari (1986)*, Fluida adalah suatu zat atau bahan yang dalam keadaan setimbang tidak dapat menahan gaya atau tegangan geser (*shear force*). Fluida juga dapat didefinisikan sebagai zat yang dapat mengalir bila ada perbedaan tekanan dan (atau) ketinggian. Fluida juga dapat didefinisikan sebagai zat yang berubah bentuk secara *kontinu* bila terkena tegangan geser. Fluida mempunyai molekul yang terpisah jauh, gaya antar molekul kecil daripada benda padat dan molekul-molekulnya lebih bebas bergerak, dengan demikian fluida lebih mudah *terdeformasi*.

Secara umum, *Fluida adalah sebuah zat yang dapat mengalir dan dapat berubah bentuk secara terus-menerus jika terkena tekanan atau gaya geser*. Fluida juga merupakan zat yang merujuk kepada zat cair (cairan) dan gas (uap). Banyak yang mengira kalau gas bukan termasuk fluida, padahal gas seperti angin dikategorikan sebagai fluida karena karakteristiknya.

Zat cair adalah zat yang untuk jumlah massa tertentu akan memiliki volume tertentu yang tidak tergantung pada bentuk benda dimana zat cair tersebut ditempatkan Untuk mengukur volume zat cair biasanya dilakukan dengan mengukur volume wadah dimana zat cair itu berada. Namun volume yang sebenarnya hanyalah sesuai jumlah yang mengisi wadah tersebut. Jika volumenya lebih kecil dari wadah, maka akan terbentuk permukaan bebas; misalnya pada danau dan tandon yang tidak terisi penuh. Sebaliknya, gas dengan jumlah massa tertentu bisa memiliki volume yang bervariasi sesuai dengan wadah dimana gas itu berada. Gas akan mengisi dan memenuhi seluruh wadah dimana gas berada (**Gambar 1.1**). Bahan bakar dalam tabung *LPG* senantiasa memiliki volume yang sama, sejak awal pemakaian sampai isinya hampir habis. Namun massa *LPG* semakin berkurang seiring dengan pemakaian *LPG* tersebut.



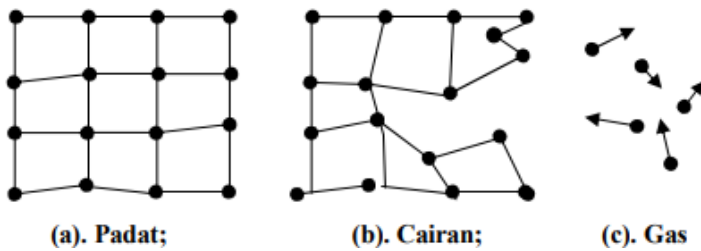
Gambar 1.1 Volume Zat Cair Dan Gas

Jika beberapa definisi di atas digabung menjadi satu, maka *Mekanika Fluida* memiliki definisi *cabang ilmu yang menelaah gaya dan gerakan yang terjadi dalam fluida*. Gaya dapat menghasilkan gerakan, dan sebaliknya gerakan dapat menghasilkan gaya. Gaya dan Gerakan selalu berkaitan dengan momentum dan energi. Kincir angin, adalah mesin fluida (*fluid machinery*) yang mengekstrak energi kinetik yang dimiliki oleh udara yang bergerak, untuk kemudian menyimpannya dalam bentuk energi listrik, atau bisa juga dikonversi secara langsung

menjadi energi mekanis untuk memompa air. Sebaliknya, kipas angin adalah mesin fluida yang mengonversikan energi listrik menjadi gerakan udara. Udara dapat digerakkan oleh kipas angin dengan menggunakan sudu-sudu dengan desain yang sedemikian hingga fluida dapat dialirkan dan diarahkan dengan baik dalam jumlah sesuai yang dibutuhkan. Pada fluida yang tidak bergerak (statis), gaya yang terjadi adalah akibat tekanan fluida pada batas/dinding dimana fluida berada.

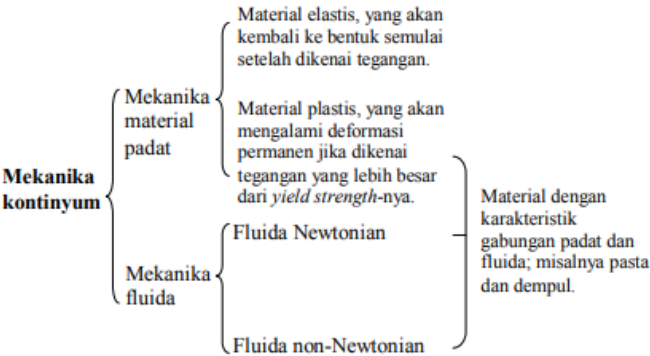
Dalam pendefinisian mekanika, pembahasan tidak diarahkan pada struktur molekul. Fluida dianggap sebagai satu kesatuan materi yang kontinyu (*fluid as continuum*) yang dapat dibagi secara *tidak terbatas* dengan mengabaikan perubahan perilaku molekul secara individual. Sejumlah molekul fluida tersebut diamati perilaku dan perubahannya sebagai satu kesatuan secara *makroskopik*.

Untuk memahami *konsep kontinyu*, perhatikan beda antara struktur molekul material padat, cair dan gas pada **Gambar 1.2**. Dalam material padat, atom diikat secara ketat oleh gaya intermolekular. Dalam zat cair gaya intermolekular menjaga kedekatan antar molekul, tetapi gaya intermolekular tersebut tidak merata dan seketat pada material padat. Adanya gangguan gaya yang kecil saja memungkinkan satu atau beberapa atom terlepas dari yang lainnya. Anggapan fluida sebagai material kontinyu mengabaikan perubahan molekuler tersebut. Fluida dianggap material kontinyu dengan ikatan yang merata seperti halnya material padat, dan dengan demikian properti fluida seperti tekanan, kecepatan, dan temperatur didefinisikan pada semua bagian dengan mengabaikan perbedaan struktur molekuler antar bagian tersebut.



Gambar 1.2 Ikatan molekul material padat, cair dan gas

Studi mekanika fluida memiliki kemiripan dengan bidang mekanika yang lain, misalnya mekanika material padat (*rigid*) dan mekanika dalam ilmu Fisika. Hukum II Newton, Hukum Konservasi Massa dan Hukum Termodinamika I & II juga digunakan dalam mekanika fluida.



Gambar 1.3 Mekanika fluida sebagai bagian dari mekanika material kontinyu

Mekanika fluida termasuk dalam studi mekanika kontinyu (*continuum mechanics*) seperti yang ditunjukkan dalam diagram pada **Gambar 1.3** di atas. *Mekanika Kontinyu* adalah studi fisik dari materi kontinyu yang terdiri dari *mekanika fluida* dan *mekanika material padat*. Studi mengenai materi yang memiliki karakteristik mendua antara fluida dan material padat disebut *rheology*. Material yang demikian hanya bisa mengalir jika tegangan geser mencapai nilai kritis untuk material tersebut, misalnya pasta gigi dan bahan dempul. *Fluida Newtonian* adalah sebutan untuk fluida yang akan mengalir secara kontinyu

berapapun gaya geser diberikan padanya. Gaya geser yang terjadi pada fluida ini akan selalu berbanding lurus secara linier dengan gradien kecepatan pada arah tegak lurus bidang gaya geser. *Fluida non-Newtonian* mengalir tidak kontinyu. Jika dikenai tegangan geser, misalnya dengan mengaduknya, maka akan timbul area kosong yang kemudian perlahan akan terisi kembali. Contoh *fluida non-Newtonian* adalah bahan puding (yang masih cair) dan cairan cat. Pengadukan pada *fluida non-Newtonian* bisa menurunkan viskositasnya, misalnya cat cair. Dalam keadaan tertentu pasir juga bisa dikategorikan sebagai *fluida non-Newtonian*. Pasir dan cat cair memiliki sifat yang sangat berbeda, hal pokok yang membuat keduanya dikategorikan sebagai *fluida non-Newtonian* adalah bahwa keduanya tidak mengalir secara kontinyu.

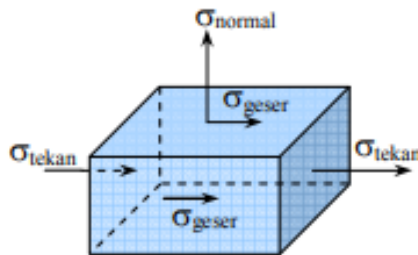
Gaya yang bekerja pada fluida dikelompokkan menjadi 2 bagian, yaitu

- Gaya Pemukaan (*surface force*), yaitu gaya yang bekerja pada batas/permukaan fluida melalui kontak fisik, terdiri dari gaya tekan atau tekanan dan gaya geser, dan
- Gaya Badan (*body force*), yaitu gaya yang bekerja tanpa kontak fisik dimana gaya tersebut didistribusikan ke seluruh elemen fluida, terdiri dari gaya gravitasi, gaya sentrifugal, gaya coriolis dan gaya elektromagnetik. Pada semua pembahasan dalam buku ini, gaya-gaya yang diperhitungkan adalah tekanan, gaya geser dan gravitasi, sedang yang lainnya diabaikan.

Selain definisi di atas, ada pengertian yang lebih *esensial* yang harus dipahami tentang fluida. Dalam pengertian ini, fluida didefinisikan sebagai zat yang akan bergerak dan mengalami perubahan secara kontinyu jika dikenai tegangan geser atau *shear stress* (τ , dibaca 'tau'). Perubahan yang dimaksud adalah perubahan struktur zat, atau deformasi. Beberapa material seperti bahan dempul dan pasta gigi hanya akan bergerak/mengalir jika tegangan geser dikenakan pada-

nya mencapai nilai kritis tertentu. Pada zat padat, plastik misalnya, jika dikenai tegangan atau tarikan maka ia akan mengalami peregangan (memanjang). Jika tarikan tersebut dihilangkan maka plastik tersebut akan kembali ke keadaan semula. Plastik tersebut tidak mengalami deformasi. Namun jika tegangan tarik diperbesar sampai melewati batas kekuatan luluh dan kemudian tegangan tersebut dihilangkan maka plastik tersebut molor atau patah dan tidak bisa kembali ke keadaan semula, maka plastik tersebut dikatakan mengalami deformasi. Plastik dan benda padat lain memerlukan gaya dalam jumlah tertentu untuk mengalami deformasi. Gaya dengan jumlah tertentu untuk mendeformasi zat padat tersebut kita kenal sebagai *yield strength*. Fluida tidak memiliki batas tegangan tersebut. Fluida mengalami deformasi yang terus menerus jika dikenai tegangan geser, sekecil apapun tegangan geser tersebut. Definisi ini hanya dikaitkan dengan tegangan geser, bukan jenis tegangan yang lain.

Apa itu Tegangan Geser? Untuk menjawab pertanyaan ini, marilah kita melihat **Gambar 1.4** di bawah ini.



Gambar 1.4 Tegangan atau Stress Pada Permukaan Material

Gambar di atas menunjukkan tegangan geser dan tegangan lain yang bekerja pada suatu elemen fluida. Tegangan normal, tegangan tarik, dan tegangan tekan memiliki arah tegak lurus terhadap permukaan elemen fluida, sedang tegangan geser menyinggung permukaan zat atau elemen fluida. Jadi, definisi fluida dibanding zat padat dikaitkan dengan karakteristik deformasinya. Fluida akan mengalami

perubahan secara terus-menerus jika dikenai tegangan geser. Fluida senantiasa berdeformasi, setiap kali menerima tegangan geser. Sedangkan zat padat memiliki reaksi deformasi yang terbatas jika menerima tegangan, yaitu baru mengalami deformasi jika tegangan yang diberikan lebih besar dari σ_{yield} nya. Dengan kata lain zat padat memerlukan sejumlah gaya tertentu untuk menghasilkan deformasi.

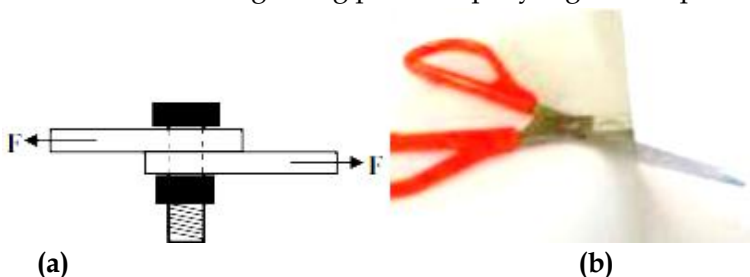
Sebagai catatan, sebutan umum untuk gaya persatuan luas adalah *stress* atau tegangan atau tekanan, dengan simbol σ . Tegangan tersebut kemudian akan mendapat simbol atau istilah yang berbeda sesuai penggunaannya; misalnya σ_{geser} menjadi τ , σ_{normal} menjadi P , dan lain sebagainya.

Tegangan geser atau *shear stress* adalah tegangan pada arah paralel atau *tangensial* (menyinggung) sisi atau permukaan material, kebalikan dari tegangan normal yang tegak lurus permukaan. Tegangan geser menyatakan gaya geser per satuan luas, dengan satuan N/m^2 . Rumus tegangan geser dinyatakan sebagai berikut:

$$\tau = \frac{F}{A} \dots \dots \dots (1.1)$$

dengan F gaya geser (N) dan A luasan paralel dengan gaya geser (m^2).

Agar lebih memahami, marilah kita melihat **Gambar 1.5**. Pada **Gambar 1.5 (a)** sebuah baut yang mengikat 2 plat mengalami tegangan geser per satuan luas baut yang paralel dengan arah tarikan kedua plat. Pada **Gambar 1.5 (b)** selembar kertas menerima tegangan geser dari gaya geser akibat pergerakan dua sisi mata gunting pada tempat yang akan dipotong.



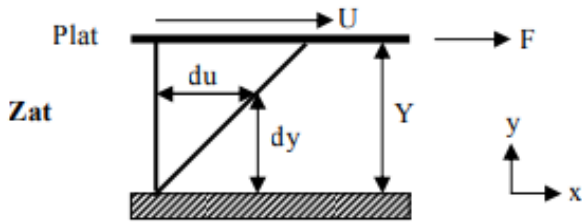
Gambar 1.5 Gaya Geser pada (a) Baut, pada (b) Kertas

Kekuatan geser atau *Shear strength* adalah batas kekuatan suatu material untuk menerima tegangan geser, mempunyai satuan yang sama dengan *shear stress* yaitu N/m^2 . Baut pada **Gambar 1.5 (a)** akan patah jika gaya geser per satuan luas baut yang diberikan melebihi *shear strength* material baut. Sedangkan gunting pada **Gambar 1.5 (b)** akan berhasil memotong kertas jika tegangan geser akibat gerakan dua sisi mata gunting telah melebihi kekuatan geser kertas. Nah... **Berapa kekuatan geser fluida?** Karena fluida selalu berdeformasi jika dikenai tegangan geser, maka kekuatan gesernya adalah *nilai minimum* tegangan geser berapapun yang mampu dibangkitkan, asalkan di atas nol.

Istilah *stress* (menggunakan simbol τ) digunakan untuk tegangan atau gaya yang bekerja pada luasan tertentu, antara lain *tensile stress* (tegangan tarik), *compressive stress* (tegangan tekan), dan *shear stress*. Sedangkan istilah *strength* (menggunakan simbol σ) digunakan untuk menyatakan batas kekuatan material untuk menahan jenis beban atau gaya tertentu tanpa mengalami deformasi permanen, misalnya *yield strength* (kekuatan luluh), *tensile strength* (kekuatan tarik), *fatigue strength* (kekuatan lelah), dan *compressive strength* (kekuatan tekan). Istilah-istilah tersebut digunakan dalam kaitan dengan kekuatan material (*strength of material*).

Apa itu Gaya Geser? Untuk menjawab pertanyaan ini, marilah kita ikuti pembahasan di bawah ini.

Sesuai definisi fluida, deformasi terjadi secara terus-menerus sekecil apapun gaya geser yang diberikan. Dari definisi fluida tersebut, selanjutnya kita akan mengenal istilah lapisan geser (*shear layer*) yang merupakan topik yang sangat penting dalam pembahasan fluida dalam berbagai macam keadaan aliran. Perhatikan **Gambar 1.6** di bawah ini. Jika gaya F menyebabkan plat bergerak dengan kecepatan U , dan menimbulkan gaya geser, sedangkan zat yang berada di antara plat dan permukaan padat memiliki kecepatan $du \neq U$ yang bervariasi pada arah y , maka zat tersebut telah mengalami deformasi. Maka, zat tersebut adalah *fluida*.



Gambar 1.6. Gradien Kecepatan Pada Fluida

Dengan,

F = gaya pada plat (N)
 U = kecepatan gerak plat (m/s)
 Y = ketinggian zat (m)
 A = luas permukaan (m²)

Fluida yang berada dalam keadaan seperti di atas akan membentuk lapisan-lapisan geser yang akibat terjadinya gradien kecepatan arah vertikal (du/dy) yang besarnya sebanding dengan gaya geser pada lapisan tersebut. Lapisan geser tersebut bisa digambarkan sebagai profil variasi kecepatan pada arah aliran sumbu y . Kecepatan fluida pada dinding permukaan padat sama dengan nol, sedangkan pada dinding plat sama besar dengan kecepatan plat. Antara permukaan padat dan plat, besarnya kecepatan antara 0 dan U . Zat yang bukan fluida tidak menghasilkan profil kecepatan atau lapisan geser ini.

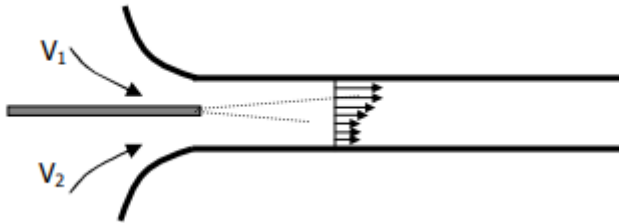
Tegangan geser (τ) yang bekerja pada fluida tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut,

$$\tau = \frac{F}{A} \approx \frac{du}{dy} \dots \dots \dots (1.2)$$

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \dots \dots \dots (1.3)$$

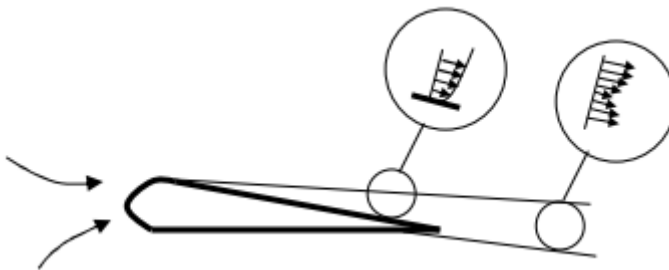
Persamaan (1.3) dibaca : *“tegangan geser yang dialami fluida sebanding dengan gradien kecepatan pada arah vertikal, dengan faktor proporsionalitas sebesar μ ”*. Besarnya μ (dibaca ‘miu’) berbeda-beda untuk setiap fluida. Faktor kesebandingan μ disebut viskositas (kekentalan) mutlak atau viskositas

dinamik fluida. Jika dikaitkan dengan jenis fluida, maka setiap fluida yang memenuhi persamaan (1.3) adalah *fluida Newtonian*, dan yang tidak memenuhi persamaan (1.3) tergolong sebagai *fluida non-Newtonian*.



Gambar 1.7 Profil Kecepatan Pada Aliran Campuran

Gambar 1.7 menunjukkan pencampuran fluida dari dua cabang pipa menuju saluran utama. Fluida yang datang dari dua pipa yang berbeda dengan kecepatan yang berbeda akan menghasilkan profil kecepatan yang mungkin tidak seragam, yang selanjutnya akan mempengaruhi keberhasilan proses pencampuran atau keakuratan perhitungan kapasitas aliran, kerugian tekanan maupun perpindahan panas dalam pipa tersebut.

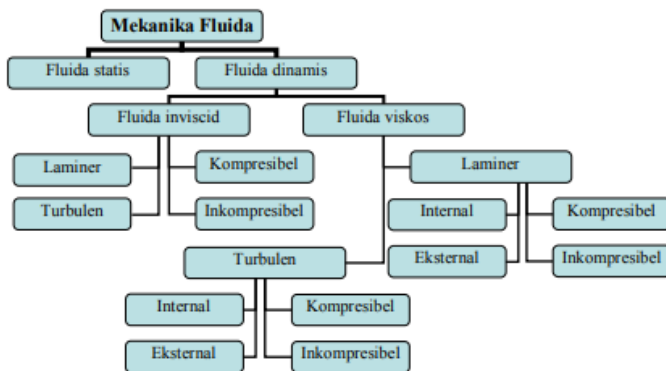


Gambar 1.8 Profil kecepatan aliran melintasi airfoil

Gambar 1.8 menunjukkan profil kecepatan pada dua posisi aliran melintasi *airfoil*. Penampang melintang berbentuk *airfoil* antara lain mewakili sayap pesawat dan sudu turbin. Profil kecepatan tersebut sangat menentukan kinerja *airfoil* karena

mempengaruhi gaya angkat dan gaya hambat yang dibangkitkan oleh *airfoil*.

Bagaimanakah.... Pengklasifikasian pada mekanika Fluida? Secara garis besar mekanika fluida dibagi menjadi dua, yaitu *fluida statis* (fluida diam, tidak bergerak); dan *fluida dinamis* (fluida bergerak). Penklasifikasian dan peristilahan dalam mekanika fluida dijelaskan pada diagram pada **Gambar 1.9** bawah ini.



Gambar 1.9 Pengklasifikasian Dalam Mekanika Fluida

Aliran *fluida inviscid* adalah aliran dengan viskositas nol, atau dianggap nol, atau aliran dimana perbedaan tegangan geser antar lapisan fluida nol (gradien kecepatan arah vertikal sudah tidak terjadi). *Fluida inviscid* selalu digunakan dalam mekanika fluida yang murni teoritis (*hidrodinamika*). Persamaan-persamaan dalam *hidrodinamika* senantiasa mengabaikan viskositas. Pada aliran *inviscid*, kecepatan fluida tidak dipengaruhi oleh permukaan padat. Pada *fluida statis* tidak terjadi tegangan geser, dengan demikian *fluida statis* adalah *fluida inviscid*.

Untuk aliran *fluida viskos*, kecepatan tepat pada permukaan padat yang tidak bergerak adalah nol. Atau dapat dikatakan bahwa tidak terjadi *slip* pada permukaan benda tempat fluida mengalir tersebut (*no-slip condition*). Sampai batas ketebalan tertentu dari permukaan tempat mengalir terjadi gradien

kecepatan sampai jarak vertikal tertentu dimana kecepatannya sama dengan kecepatan aliran bebas. Pada bagian dimana kecepatan fluida sudah sama dengan kecepatan aliran bebas, fluida dapat dianggap *inviscid*.

Aliran *laminer* adalah aliran dimana partikel fluida bergerak sejajar dalam layer atau serat aliran fluida. Sedangkan aliran *turbulen* adalah aliran dimana partikel fluida bergerak ke segala arah dengan kecepatan sama atau berbeda terhadap proyeksi sumbu x , y dan z . Partikel fluida berpindah dari satu *layer* ke *layer* lainnya dengan gerakan yang acak. Profil kecepatan aliran *laminer* lebih tumpul, sedangkan aliran *turbulen* lebih datar (*flat*) karena kecepatannya lebih seragam, seperti terlihat pada **Gambar 1.10**. Tingkat *turbulensi* yang terjadi bergantung pada *kekentalan fluida*, *berat jenis*, *kecepatan pergerakan partikel itu sendiri*, dan *geometri tempat fluida mengalir*.



Gambar 1.10 Aliran Laminer dan Turbulen

Aliran *internal* adalah aliran fluida yang dibatasi oleh permukaan padat, misalnya aliran dalam pipa. Sedangkan aliran *eksternal* adalah aliran fluida di sekitar benda padat, dimana benda tersebut dilingkupi atau direndam oleh aliran fluida, misalnya aliran di sekitar bodi mobil dan aliran melintasi gedung/bangunan. Sebuah kategori lain yang tidak termasuk dalam aliran *internal* maupun *eksternal* adalah aliran dalam saluran terbuka (*open channel flow*) misalnya aliran melalui sungai.

Selain istilah-istilah sesuai pengklasifikasian di atas, kita akan sering menggunakan istilah aliran stedi (*steady*) dan tidak stedi (*unsteady*) serta aliran seragam (*uniform*) dan tidak seragam (*non uniform*). Bila properti-properti fluida di suatu posisi dalam medan aliran tidak berubah menurut waktu,

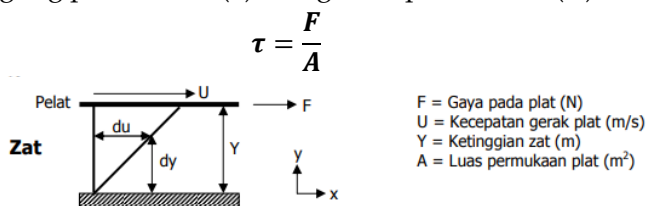
aliran tersebut disebut aliran *stedi* atau aliran *stasioner*. Pada aliran *stedi*, variabel-variabel aliran bisa berubah dari satu posisi ke posisi lainnya, tetapi nilai variabel tersebut harus tetap di posisi yang sama setiap saat. Sedangkan aliran *tidak stedi* adalah aliran dimana propertinya berubah terhadap waktu. Suatu aliran dikatakan seragam bila kecepatan pada arah tegak lurus terhadap penampang saluran sama besar di seluruh bagian permukaan penampang tersebut. Dalam kebanyakan eksperimen aliran fluida, aliran dikondisikan dalam keadaan seragam.

Dalam analisis mekanika fluida, ada juga istilah fluida ideal (*ideal fluids*) dan fluida sempurna (*perfect fluids*). *Fluida ideal* adalah fluida yang tanpa viskositas dan tidak bisa dimampatkan; fluida yang diidealkan ini sebenarnya tidak ada. Sedangkan *fluida sempurna* adalah fluida tanpa viskositas, tapi bisa dimampatkan.

1. Prinsip Dasar Fluida

1.1. Tegangan Geser

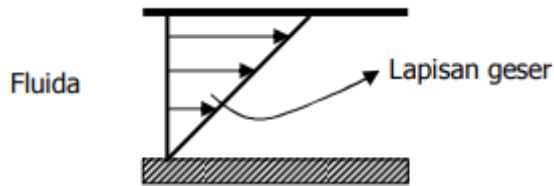
Tegangan geser (τ) adalah komponen gaya yang menyinggung permukaan (F) dibagi luas permukaan (A).



Gambar 1.11 Sama Dengan Gambar 1.5

Jika F menyebabkan plat bergerak dengan kecepatan U , sedang zat yang berada di antara plat dan permukaan padat memiliki kecepatan $du \neq U$, maka zat tersebut telah mengalami deformasi. Maka, zat tersebut adalah *fluida*.

1.2. Lapisan Geser (Shear Layers)



Gambar 1.12 Lapisan Geser

Fluida yang berada dalam keadaan seperti di atas akan menghasilkan lapisan geser yang memiliki tebal (**arah y**) dan besar kecepatan tertentu. Lapisan geser tersebut membentuk variasi atau profil kecepatan pada arah aliran fluida. Kecepatan fluida pada dinding permukaan padat sama dengan nol, sedangkan pada dinding plat sama besar dengan kecepatan plat. Zat yang bukan fluida tidak menghasilkan profil kecepatan atau lapisan geser ini. Contoh terjadinya lapisan geser ditunjukkan pada **Gambar 1.7** dan **1.8** di atas.

Profil *shear layer* menghasilkan efek yang mempengaruhi efisiensi volumetris suatu aliran, mempengaruhi kerugian tekanan, perpindahan panas, dsb. Pada pesawat atau kendaraan antara mempengaruhi kestabilan dan efek suara.

1.3. Karakteristik Deformasi

Fluida akan mengalami deformasi terus menerus jika dikenai tegangan geser. Fluida tidak mampu menerima tegangan geser tanpa berubah bentuk (deformasi). Sedangkan zat padat memiliki reaksi deformasi yang terbatas jika menerima tegangan, yaitu baru mengalami deformasi jika tegangan yang diberikan lebih besar dari τ_{yield} nya. Dengan kata lain zat padat memerlukan sejumlah gaya tertentu untuk menghasilkan deformasi.

Sehari-hari dengan Fluida. Kadang kita tidak menyadari, bahwa dalam kehidupan sehari-hari kita sering “bertemu” dengan fluida. Fluida dalam kehidupan sehari-hari adalah

- PDAM harus menyuplai air dengan debit dan tekanan yang memadai untuk mengatasi hambatan aliran di sepanjang pipa aliran agar airnya sampai ke rumah tinggal konsumen.
- Air pendingin radiator harus dialirkan dengan kecepatan tertentu untuk memindahkan panas secara efektif.
- Gunung, bukit, pasir dan lembah terjadi akibat gaya-gaya yang ditimbulkan aliran udara atau air yang menemui halangan.
- Kincir angin berputar karena digerakkan oleh aliran udara, sebaliknya kipas angin berputar untuk menggerakkan udara dan menghasilkan aliran udara. Baling-baling kapal dan pesawat berputar untuk menghasilkan aliran fluida dan gaya dorong (sebagai gaya reaksinya).
- Kita dapat merasakan hambatan aerodinamik wajah dan tubuh kita ketika berjalan menentang angin yang kencang.
- Lambung kapal, sayap dan body pesawat dibuat halus untuk mengurangi gaya hambat; bola golf dibuat kasar juga untuk mengurangi hambatan terhadap gerakannya.
- Letupan cambuk merupakan gelombang kejut karena ujung cambuk bergerak dengan kecepatan *supersonik*.
- Jantung koroner terjadi akibat penyempitan pembuluh darah ($\approx$ pipa) sehingga *suplai* darah ($\approx$ fluida) ke jantung ($\approx$ pompa) terganggu. *Biomechanic engineering* mengembangkan teknologi agar aliran darah ke jantung tidak turbulen tetapi supaya laminar, sehingga organ-organ jantung tidak menerima aliran darah yang berat.

Ingin Tahu... Histori Mekanika Fluida? Histori atau sejarah dari Mekanika Fluida adalah sebagai berikut,

- Pada zaman *prasejarah* orang melontar batu, lempeng, anak panah yang sudah memiliki bentuk *aerodinamis* tertentu. Sistem irigasi ditemukan di antara puing-puing sejarah Mesir dan Mesopotamia (3000 SM).

- Saluran air dibangun bangsa Romawi (abad 4 SM). *Archimedes* merumuskan hukum mengenai benda terapung (abad 3 SM).
- *Galileo* (1564-1642) berjasa bagi ilmu mekanika; *Newton* (1642-1772) untuk hukum tentang gerak.
- Sejak abad pertengahan, muncul 2 aliran dalam ilmu fluida:
 - **Hidrolika**, Penganutnya adalah orang-orang yang bekerja di lapangan yang bereksperimen secara empirik. Rumus-rumus dan kesimpulan disusun berdasar pengujian/eksperimen murni. Tokoh-tokohnya antara lain : *Castelli, Torricelli, Pitot, Venturi, Weber, Coriolis, Coulomb, Froude*, dll
 - **Hidrodinamika**, (Matematika-Mekanika Fluida). Aliran ini membahas gerakan fluida (misalnya pusaran air, tornado, dsb.) secara teoritis murni berdasar persamaan matematis. Tokoh-tokohnya antara lain : *Bernoulli, Euler, d'Alembert, Lagrange, Laplace, Poisson, Navier, Stokes, Rayleigh, Reynold, Kelvin*, dll.

Tahun 1904 *Ludwig Prantl* (1875-1953) memperkenalkan teori yang mengkompromikan 2 aliran tersebut, yaitu teori mengenai Lapisan Batas (*Boundary Layer*), yang menerangkan perbedaan perilaku fluida sejati yang diamati pakar *hidrolika* dan prediksi-prediksi dari teori fluida tidak viscous (tidak kental)-nya pakar *hidrodinamika*.

Ingin Tahu... Viskositas? Marilah kita kembali memperhatikan persamaan (1.2) dan (1.3), yaitu

$$\tau = \frac{F}{A} \approx \frac{du}{dy}$$

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

$\frac{du}{dy}$ = Gradien kecepatan pada arah vertikal, atau laju

deformasi fluida

μ = Faktor kesebandingan antara τ dan $\frac{du}{dy}$ yang nilainya

tergantung pada jenis fluidanya.

= disebut **Viskositas (=kekentalan)**

Berdasar rumus di atas, dapat disimpulkan: Untuk tegangan geser yang sama, fluida dengan viskositas tinggi akan mengalami deformasi dalam tingkat yang lebih kecil dibandingkan fluida dengan viskositas lebih rendah (= lebih encer).

Faktor-faktor yang mempengaruhi viskositas:

- **Kohesi.** Gaya tarik menarik antara molekul fluida
- **Transfer momentum molekuler.** Dalam fluida yang mengalir, terjadi *transfer momentum* yang melintasi *shear layer*. Perpindahan momentum tersebut mengakibatkan *layer* yang berdekatan memiliki kecepatan yang cenderung sama. Parameter yang mewakili *transfer molekuler* adalah du/dy . Pada fluida diam atau fluida yang bergerak sedemikian hingga tidak terjadi gerak relatif antara layer terdekat $du/dy = 0$.

Viskositas cairan lebih didominasi *kohesi* (akibat molekul yang rapat). *Gaya kohesi* semakin kecil jika temperatur mengalami kenaikan, sehingga viskositas cairan menurun akibat peningkatan temperatur. Viskositas gas lebih dipengaruhi oleh *transfer momentum* (gerak molekuler). Viskositas gas meningkat akibat peningkatan temperatur.

Satuan Viskositas

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy} \left[\frac{N.s}{m^2} \right] = \left[\frac{kg}{m.s} \right] \text{ disebut viskositas mutlak atau viskositas dinamik}$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \text{ disebut viskositas relatif atau viskositas kinematik} \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

2. Dimensi Dan Satuan

Dimensi adalah ukuran yang digunakan untuk mengekspresikan secara kuantitatif suatu variabel fisik.

Satuan adalah cara untuk mengaitkan suatu angka atau jumlah kepada dimensi kuantitatif.

Dengan pengertian tersebut di atas, panjang adalah *dimensi* dari variabel-variabel seperti jarak, panjang langkah, lebar, ketinggian, diameter, defleksi, dll; sedangkan meter atau feet merupakan *satuan* untuk menyatakan dimensi panjang tersebut.

Untuk mendeskripsikan suatu keadaan atau variabel secara terukur, kita membutuhkan suatu ukuran kuantitatif untuk keadaan tersebut. Angka-angka dalam matematika bersifat abstrak, dan belum mempunyai makna fisik sebelum angka itu dilengkapi dengan ukuran kuantitatif dan satuannya. Misalkan, $5 + 5 = 10$, adalah pernyataan matematika yang abstrak; namun jika kita mengatakan bahwa $5 + 5 = 10$ adalah pernyataan untuk dimensi panjang, makna fisik dari angka tersebut baru terdefinisi dengan nyata. Jika kita menggunakan 'meter' sebagai satuan dalam perhitungan di atas berarti kita telah memilih salah satu standar sistem satuan atau cara untuk menyatakan dimensi kuantitatif panjang tersebut.

Sistem satuan yang digunakan dalam dunia rekayasa/ keteknikan ada tiga macam; yaitu *System International (SI)*, *British Gravitational (BG)*, dan *English Engineering (EE)*. Sistem satuan *EE* bisa dikatakan *sudah mati* dan tidak digunakan lagi.

Agar lebih mendalami pemahaman tentang Fluida, Marilah kita mempelajari Fluida Statis dan Fluida Dinamis, yang dijelaskan dalam bab berikutnya.

BAB II

FLUIDA STATIS

Zat di alam dikelompokkan dalam tiga wujud utama, yaitu zat padat, zat cair, dan gas. Zat cair dan gas memiliki satu kesamaan yaitu *tidak memiliki bentuk yang tetap*. Bentuk zat cair dan gas mengikuti bentuk wadah. Zat cair dan gas mudah ditembus atau dibagi-bagi. Hal ini disebabkan gaya tarik antar atom atau molekul penyusun zat cair dan gas jauh lebih lemah daripada gaya tarik antar atom penyusun zat padat. Dan salah satu sifat yang sering kita amati adalah zat cair dan gas dapat mengalir. Zat dengan sifat yang dapat mengalir tersebut kita namakan fluida.

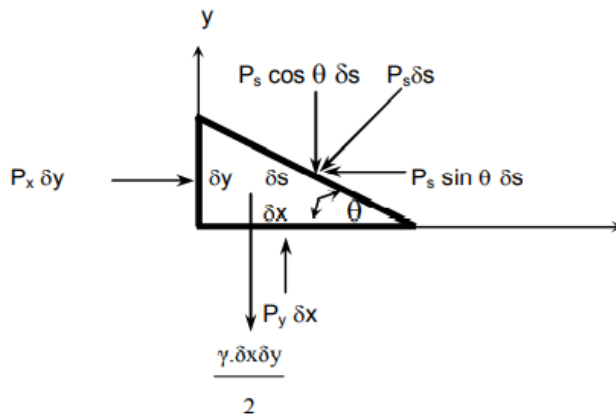
Pada bab ini, kita akan membahas sejumlah sifat yang dimiliki oleh fluida yang diam (*fluida statis*) dan fluida yang bergerak (*fluida dinamika*) pada bab berikutnya. Sifat-sifat tersebut sangat penting untuk dipahami karena memiliki banyak aplikasi dalam kehidupan kita, baik dalam bentuk teknologi sederhana maupun teknologi canggih. Jika kita tidak memahami sifat fluida maka tidak mungkin manusia membuat kapal termasuk kapal tanker raksasa, kapal selam, balon udara, pesawat terbang, helikopter, pesawat ulang-alik, dan sebagainya.

Fluida statis adalah fluida dalam keadaan diam atau fluida bergerak yang tidak terjadi atau diasumsikan tidak terjadi perbedaan kecepatan relatif antara lapisan-lapisan geser dalam fluida tersebut. Pada fluida statis, *nilai tekanan sama dalam semua arah*.

1. Filosofi Fluida Statis

1.1. Persamaan Dasar Fluida Statis

Fluida statis adalah fluida dalam keadaan diam atau fluida tidak bergerak atau diasumsikan tidak terjadi perbedaan kecepatan relatif antara lapisan-lapisan geser dalam fluida tersebut. Pada fluida statis, nilai tekanan sama dalam semua arah. Suatu elemen fluida δA yang terendam dalam fluida diam akan mendapat gaya yang konstan, yang bekerja pada sisi-sisinya. **Gambar 2.1** di bawah ini dan penurunan rumusnya membuktikan bahwa tekanan dalam fluida statis sama ke semua arah.



Gambar 2.1. Gaya Pada Elemen Fluida Statis

$$\Sigma F_x = m \cdot a_x$$

$$P_x \cdot \delta y - P_s \cdot \sin \theta \cdot \delta s = \frac{\delta x \cdot \delta y}{2} \cdot \rho \cdot a_x \approx 0$$

$$\triangleq = \delta y$$

$$P_x \cdot \delta y - P_s \cdot \delta y = 0$$

$$P_x = P_s$$

$$\Sigma F_y = m \cdot a_y$$

$$P_y \cdot \delta x - P_s \cdot \cos \theta \cdot \delta s - \frac{\gamma \cdot \delta x \cdot \delta y}{2} = \frac{\delta x \cdot \delta y}{2} \cdot \rho \cdot a_y \approx 0$$

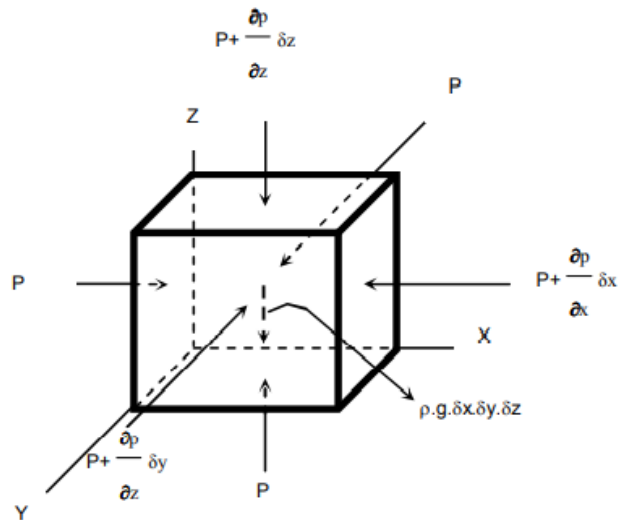
$$\triangleq = \delta x$$

$$P_y \cdot \delta x - P_s \cdot \delta x = 0$$

$$P_y = P_s$$

$$P_x = P_y = P_s$$

1.2. Variasi Tekanan Dalam Fluida Statis Akibat Gaya Gravitasi



$$\text{Arah sumbu X : } P \cdot \delta y \cdot \delta z - \left(P + \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \delta x \right) \cdot \delta y \cdot \delta z = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

$$\text{Arah sumbu Y : } P \cdot \delta x \cdot \delta z - \left(P + \frac{\partial p}{\partial y} \cdot \delta y \right) \cdot \delta x \cdot \delta z = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0$$

$$\text{Arah sumbu Z : } P \cdot \delta x \cdot \delta y - \left(P + \frac{\partial p}{\partial z} \cdot \delta z \right) \cdot \delta x \cdot \delta y - \rho \cdot g \cdot \delta x \cdot \delta y \cdot \delta z = 0$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} \cdot \delta z - \rho \cdot g \cdot \delta z = 0$$

$$\partial p = -\rho \cdot g \cdot \delta z \longrightarrow \boxed{P - P_0 = -\rho \cdot g (z - z_0)}$$

$$\text{Jika } z_0 = 0 \text{ maka } \longrightarrow \boxed{P = P_0 - \rho \cdot g \cdot z}$$

$$\text{atau } \boxed{P = P_0 + \rho \cdot g \cdot z} ; \text{ Jika kedalaman dianggap sebagai ketinggian negatif.}$$

Tekanan total pada fluida statis merupakan penjumlahan dari tekanan atmosferik yang bekerja pada permukaan fluida (P_0) dan tekanan akibat gaya gravitasi pada ketinggian z .

$$P - P_o = \rho g z$$

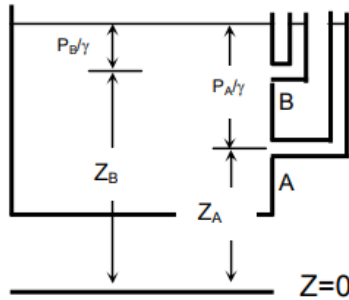
$$\text{Jika } \Delta P = P - P_o \text{ dan } \rho g = \gamma$$

$$\text{Maka } \Delta P = \gamma z$$

$$\frac{P}{\gamma} + z \text{ disebut } \mathbf{Piezometric Head} \begin{cases} \frac{P}{\gamma} \text{ disebut } \mathbf{Pressure Head} \\ z \text{ disebut } \mathbf{Potential Head} \end{cases}$$

Persamaan di atas dapat ditulis $\frac{P_2 - P_1}{\gamma} = -(z_2 - z_1)$ yang menyatakan bahwa peningkatan *pressure head* sama dengan penurunan *potensial head*.

Jika dituliskan $\frac{P_1}{\gamma} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + z_2$. Persamaan ini menyatakan bahwa Piezometric Head dalam zat cair diam yang homogen adalah konstan. Mari kita lihat gambar analisa di bawah ini,



Bidang datum

$$\frac{P_A}{\gamma} > \frac{P_B}{\gamma} ; z_A < z_B$$

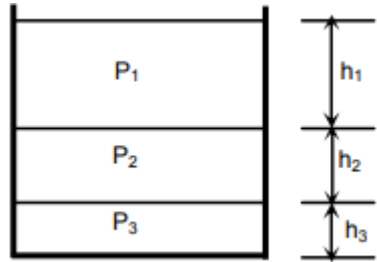
tetapi *Piezometric Head* keduanya sama.

$$\frac{P_A}{\gamma} + z_A = \frac{P_B}{\gamma} + z_B$$

sebagaimana ditunjukkan oleh tinggi kolom zat cair yang terhubung A dan B sama.

Jika dalam suatu wadah terdapat beberapa zat cair dengan ρ yang berbeda dan tidak saling bereaksi atau

saling melarutkan maka akan terbentuk lapisan, dimana fluida dengan ρ tertinggi terletak paling bawah.



$$P_1 = P_o + \rho_1 \, g \, h_1$$

$$P_2 = P_1 + \rho_2 \, g \, h_2 = P_o + \rho_1 \, g \, h_1 + \rho_2 \, g \, h_2,$$

dst

Piezometric Head di semua lapisan tidak sama.

1.3. Pengukuran Tekanan

Kebanyakan alat ukur tekanan menyatakan nilai “tekanan relatif” atau “pressure gauge” atau “selisih tekanan”, yaitu selisih antara tekanan di titik yang diukur dengan tekanan atmosferik. Jadi, $P_{\text{gauge}} = 1 \text{ atm}$ adalah sama dengan $P_{\text{abs}} = 1 \text{ atm} + 1 \text{ atm}$ atau $P_{\text{abs}} = 2 \text{ atm}$.

Tekanan atmosferik adalah tekanan lingkungan dimana pengukuran dilakukan. Keadaan atmosfer standar berbeda antara satu tempat dengan tempat yang lain. Keadaan atmosfer untuk standar Amerika ditunjukkan dalam Tabel di bawah ini.

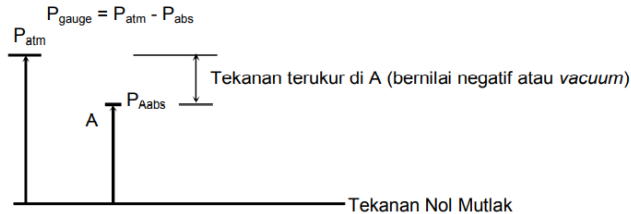
Tabel 2.1. Keadaan Atmosfer Untul Standar Amerika

Properti	Simbol	Nilai
Temperatur	T	15 °C
Tekanan	P	101.3 kPa (abs)
Densitas	ρ	1.225 kg/m ³
Kekentalan mutlak	μ	1.781x10 ⁻⁵ kg/(m.s) (Pa.s)

Tekanan Terukur = Tekanan Relatif = Tekanan Mutlak – Tekanan Atmosfer

Kemungkinan keadaan hasil pengukuran ditunjukkan di bawah ini :

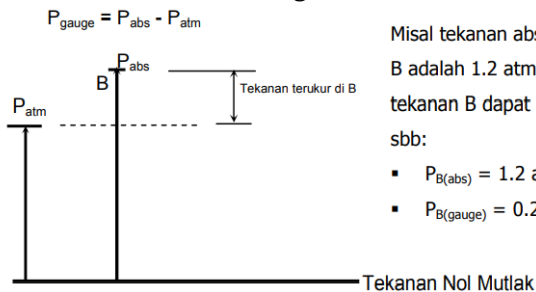
a) Tekanan di Titik Pengukuran < Tekanan Atmosfer



Misal, tekanan absolut (harga tekanan di atas tekanan nol mutlak) di titik A adalah 0,8 atm, maka tekanan di titik A dapat dinyatakan sebagai berikut:

- $P_{A(\text{abs})} = 0,8 \text{ atm (abs)}$
- $P_{A(\text{gauge})} = -0,2 \text{ atm}$
- $P_{A(\text{gauge})} = 0,2 \text{ atm (vacuum)}$

b) Tekanan di Titik Pengukuran > Tekanan Atmosfer



Misal tekanan absolut di titik B adalah 1.2 atm; maka tekanan B dapat dinyatakan sbb:

- $P_{B(\text{abs})} = 1.2 \text{ atm (abs)}$
- $P_{B(\text{gauge})} = 0.2 \text{ atm}$

Satuan Tekanan

- 1 atmosfer = 1 atm , menyatakan nilai standar tekanan di permukaan laut.
- bar , merupakan singkatan dari 'barometer'.
- Tekanan dinyatakan sebagai gaya per satuan luas.
 $P = F/A = \text{N/m}^2 = \text{Pascal} ; \text{lb}_f/\text{inc}^2 \dots\dots \text{dsb.}$
- kPa (abs) artinya kilo pascal absolut atau tekanan absolut dalam satuan kPa.
- kPa (gauge) artinya tekanan gauge (relatif) dalam satuan kPa.
- ata artinya atmosfer absolut.
- psia artinya *pound square inc absolute* = tekanan absolut dalam lb_f/inc^2 .
- psig artinya *pound square inch gauge*.
- psfa artinya *pound square feet absolute* ($\text{lb}_f/\text{ft}^2 \text{ abs}$).
- psfg artinya *pound square feet gauge*.

Konversi Satuan

- $1 \text{ bar} = 100000 \text{ Pa} = 100 \text{ kPa} = 10^5 \text{ N/m}^2$
- $1 \text{ atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa} = 14.7 \text{ lb}_f/\text{inc}^2 (= \text{psi}) = 760 \text{ mmHg}$

Contoh Soal

Batas kedalaman yang aman bagi seorang penyelam adalah 50 meter. Berapa intensitas tekanan pada kedalaman tersebut dalam air tawar dan air laut (SG air laut = 1.025)

Penyelesaian

$$P_{air\ tawar} = \rho g h = 1000 \frac{kg}{m^3} \times 9,81 \frac{m}{s^2} \times 50\ m = 4,91 \times 10^5\ Pa$$

Nilai tekanan tersebut merupakan nilai tekanan relatif. Untuk mendapatkan nilai tekanan absolut harus dijumlahkan dengan tekanan atmosfer (1 atm = 1.01325 x 10⁵ Pa) yang bekerja pada permukaan air.

$$P_{air\ laut} = \rho_1 g h \text{ dimana } \rho_1 = \rho SG_{air\ laut}$$

$$P_{air\ laut} = 1,025 \times 1000 \times 9,81 \times 50$$

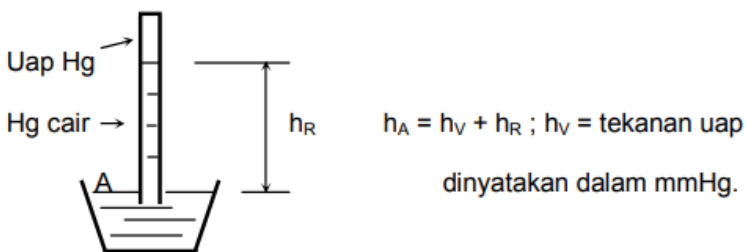
$$P_{air\ laut} = 5,03 \times 10^5\ Pa\ (gauge)$$

1.4. Alat Ukur Tekanan

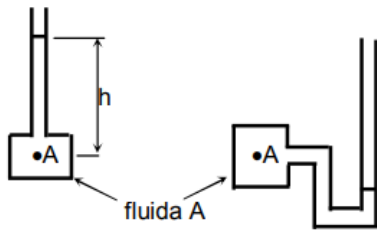
1) Tabung Bourdon merupakan alat ukur yang mengukur tekanan relatif, ditunjukkan dengan jarum penunjuk tekanan yang bekerja secara mekanis.

2) Alat ukur yang menggunakan “panjang kolom” fluida

❖ **Barometer air raksa**, digunakan untuk mengukur P_{atm} lokal.



❖ **Manometer** : mengukur perbedaan tekanan

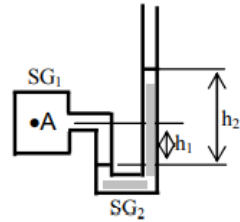


$$h_A = h \times SG_A$$

$$h_A = -h \times SG_A$$

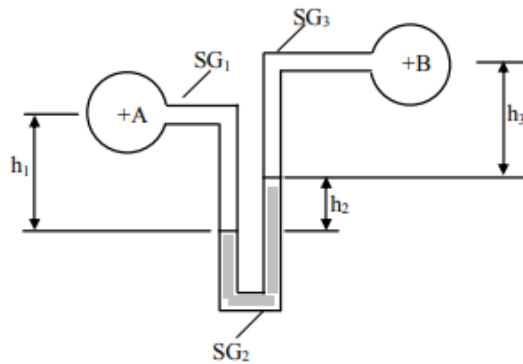
SG = specific gravity

SG₁ = SG fluida 1



$$h_A + h_2 SG_1 - h_1 SG_2 = 0$$

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



Prosedur Perhitungan

- Titik A sebagai acuan
- Tanda + jika posisi ketinggian fluida berikutnya lebih rendah dari acuan sebelumnya, dan sebaliknya.

Gambar bulat atau kotak pada titik pengukura A dan B menyatakan penampang melintang pipa atau saluran yang diukur tekanannya.

panjang kolom air, maka dapat ditulis sebagai berikut :

$$P_A + h_1 \gamma_1 - h_2 \gamma_2 - h_3 \gamma_3 = P_B$$

$$P_A - P_B = -h_1 \gamma_1 + h_2 \gamma_2 + h_3 \gamma_3$$

$$h_A - h_B = -h_1 \gamma_1 + h_2 \gamma_2 + h_3 \gamma_3$$

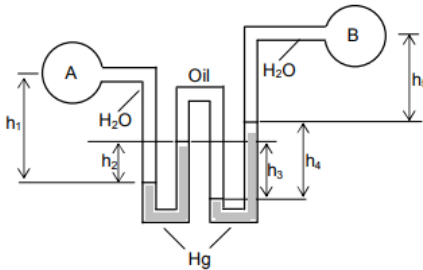
$$(S = SG = \text{Specific gravity} ; \gamma = \rho g)$$

- ❖ Mikromanometer (manometer mikro)
- ❖ Inclined manometer (manometer miring).

Contoh Soal Manometer

Air mengalir melalui pipa A dan B. Oil dengan SG 0.8 berada pada bagian atas pipa manometer pada sisi yang berbentuk U terbalik. Air raksa (SG = 13.6) berada pada bagian bawah bengkokan manometer. Hitung $P_A - P_B$!

Penyelesaian



Lihat gambar di samping:

$$h_1 = 250 \text{ mm}$$

$$h_2 = 75 \text{ mm}$$

$$h_3 = 100 \text{ mm}$$

$$h_4 = 125 \text{ mm}$$

$$h_5 = 200 \text{ mm}$$

Dengan mengikuti prosedur di atas, kita peroleh:

$$P_A + \rho_{H_2O} \cdot g \cdot h_1 - \rho_{Hg} \cdot g \cdot h_2 + \rho_{Oil} \cdot g \cdot h_3 - \rho_{Hg} \cdot g \cdot h_4 - \rho_{H_2O} \cdot g \cdot h_5 = P_B$$

$$P_A - P_B = g (-\rho_{H_2O} \cdot h_1 + 13.6 \cdot \rho_{H_2O} \cdot h_2 - 0.8 \rho_{H_2O} \cdot h_3 + 13.6 \cdot \rho_{H_2O} \cdot h_4 + \rho_{H_2O} \cdot h_5)$$

$$= g \cdot \rho_{H_2O} (-h_1 + 13.6 \cdot h_2 - 0.8 \cdot h_3 + 13.6 \cdot h_4 + h_5)$$

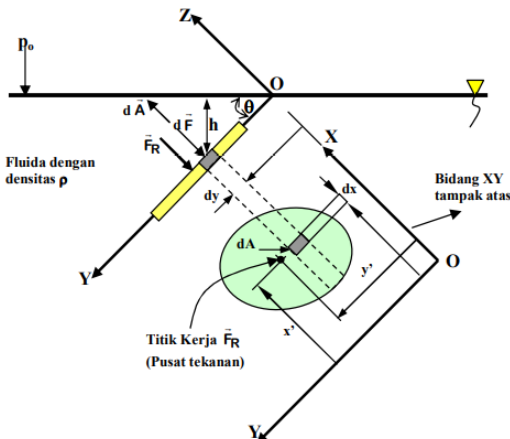
$$= g \cdot \rho_{H_2O} [(-250 + 1020 - 80 + 1700 + 200) \text{ mm}]$$

$$= 9.81 \text{ m/s}^2 \times 1000 \text{ kg/m}^3 \times 2.59 \text{ m}$$

$$= 25.4 \text{ kPa}$$

$$\text{Jadi : } P_A - P_B = 25.4 \text{ kPa}$$

3) Gaya Hidrostatik Pada Permukaan Datar



- Fluida dalam keadaan statis, sehingga tidak ada *shear stress* (dalam persamaan tidak ada komponen viskositas μ); gaya bekerja pada arah normal terhadap permukaan.
- Luas elemen permukaan

$$d\vec{A} = dx dy \hat{k}$$

$$d\vec{A} = dx dy \hat{k}$$

$$d\vec{F} = -p d\vec{A} \rightarrow \text{arah positif vektor } d\vec{A} \text{ sama dengan arah sumbu Z positif}$$

Resultan gaya: $\vec{F}_R = \int_A -p d\vec{A} \rightarrow dp = \rho g dh$

$$p - p_0 = \rho g \int_0^h dh$$

$$p = p_0 + \rho g h \rightarrow h = y \sin \theta$$

$$p = p_0 + \rho g y \sin \theta$$

Titik kerja resultan gaya $\vec{F}_R$ adalah titik dimana momen akibat resultan gaya terhadap suatu sumbu = Total momen akibat gaya-gaya yang terdistribusi terhadap sumbu yang sama.

$$\vec{r}' \times \vec{F}_R = \int_A \vec{r} \times d\vec{F} = - \int_A \vec{r} \times p d\vec{A} \rightarrow \vec{r}' : \text{vektor posisi dari suatu pusat koord}$$

sembarang yang dipilih terhadap titik kerja
resultan gaya $\vec{F}_R$

dimana $\vec{r}' = \hat{i} x' + \hat{j} y'$

$$d\vec{A} = dA \hat{k}$$

$$\vec{r} = \hat{i} x + \hat{j} y$$

$$\vec{F}_R = -F_R \hat{k}$$

$\vec{F}_R$ bekerja berlawanan arah dengan $d\vec{A}$

Substitusikan ke persamaan sebelumnya:

$$(\hat{i} x' + \hat{j} y') \times (-F_R \hat{k}) = \int (\hat{i} x + \hat{j} y) \times d\vec{F} = - \int_A (\hat{i} x + \hat{j} y) \times p dA \hat{k}$$

$$-\hat{i} x' \times F_R \hat{k} - \hat{j} y' \times F_R \hat{k} = -\hat{i} x \times p dA \hat{k} - \hat{j} y \times p dA \hat{k}$$

Berdasarkan operasi hasil kali vektor:

$$\hat{i} \times \hat{k} = -\hat{j}$$

$$\hat{j} \times \hat{k} = \hat{i}$$

Sehingga diperoleh:

$$\hat{j} x' F_R - \hat{i} y' F_R = \int_A (\hat{j} x p - \hat{i} y p) dA$$

Persamaan di atas merupakan persamaan vektor sehingga komponen-komponennya sama, sebagai berikut:

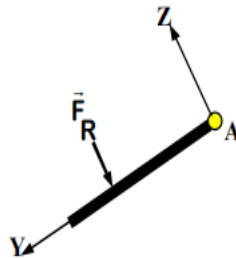
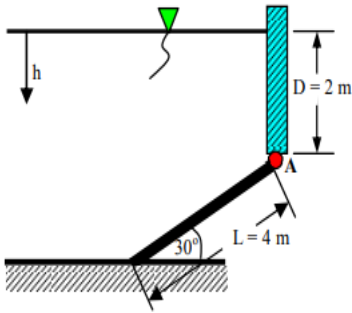
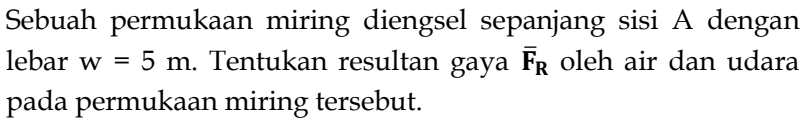
$$y' F_R = \int_A y p dA$$

$$x' F_R = \int_A x p dA$$

- Besarnya resultan gaya, $\bar{\mathbf{F}}_R = |\bar{\mathbf{F}}_R| = \int \mathbf{p} dA$
- Arah $\bar{\mathbf{F}}_R$ normal terhadap permukaan
- Pada bidang XY garis kerja $\bar{\mathbf{F}}_R$ melalui pusat tekanan (X', Y') dan $\mathbf{y}' \mathbf{F}_R = \int \mathbf{y} \mathbf{p} dA$

$$\mathbf{x}' F_R = \int_A \mathbf{x} p \, dA$$

Contoh Soal



Penyelesaian

Resultan gaya: $\vec{F}_R = \int_A -p d\vec{A}$; $dp = \rho g dh$; $d\vec{A} = w dy \hat{k}$

$$** \quad \vec{F}_R = - \int_A p d\vec{A} = - \int_A p w dy \hat{k}$$

$$** p = p_{\text{atm}} + \rho gh$$

→ Pada sisi bawah permukaan juga bekerja tekanan atmosferik sehingga p_{atm} dari permukaan dan bawah saling meniadakan, atau bisa dihilangkan dari persamaan

$$p = \rho gh$$

$$\rightarrow h = D + y \sin 30^\circ$$

$$\begin{aligned}
 \vec{F}_R &= - \int_A p d\vec{A} = - \int_0^L \rho g [D + y \sin 30^\circ] w dy \hat{k} \\
 &= \rho g w \left[Dy + \frac{y^2}{2} \sin 30^\circ \right]_0^L \hat{k} = - \rho g w \left[DL + \frac{L^2}{2} \sin 30^\circ \right] \hat{k} \\
 &= 999 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 5\text{m} \left[2\text{m} \times 4\text{m} + \frac{16}{2} \text{m}^2 \times \frac{1}{2} \right] \hat{k} \\
 &= -588 \times 10^3 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \hat{k} = -588 \text{ kN } \hat{k}
 \end{aligned}$$

$\vec{F}_R$ bekerja sebesar 588 kN pada arah sumbu Z negatif !

Menentukan garis kerja $\vec{F}_R$; A (0,0,0) ditentukan sebagai pusat sumbu.

$$y' F_R = \int_A y p dA \text{ dan } x' F_R = \int_A x p dA$$

$$\begin{aligned}
 \rightarrow y' &= \frac{1}{F_R} \int_A y p dA = \frac{1}{F_R} \int_0^L y p w dy = \frac{\rho g w}{F_R} \int_0^L y [D + y \sin 30^\circ] dy \\
 &= \frac{\rho g w}{F_R} \left[\frac{Dy^2}{2} + \frac{y^3}{3} \sin 30^\circ \right]_0^L = \frac{\rho g w}{F_R} \left[\frac{DL^2}{2} + \frac{L^3}{3} \sin 30^\circ \right] \\
 &= 999 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 5\text{m} \cdot \frac{1}{588 \cdot 10^3 \text{ N}} \left[\frac{2\text{m} \cdot 16\text{m}^2}{2} + \frac{64\text{m}^3}{3} \cdot \frac{1}{2} \right]
 \end{aligned}$$

$$y' = 2.22 \text{ m}$$

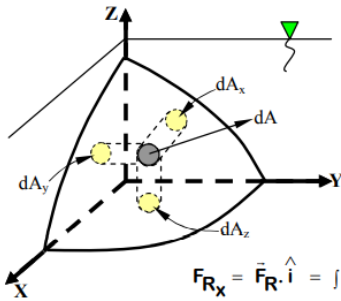
$$\begin{aligned}
 \rightarrow x' &= \frac{1}{F_R} \int_A x p dA = x \cdot \frac{1}{F_R} \int_A p dA = x \cdot \frac{1}{F_R} \cdot p \cdot A = x \cdot \frac{1}{F_R} \cdot F_R = x \rightarrow x = w/2 \\
 &\quad \downarrow \\
 &\quad \text{(luas elemen konstan)}
 \end{aligned}$$

$$= w/2 = 5/2 = 2.5 \text{ m}$$

$$\vec{r}' = 2.5 \hat{i} + 2.22 \hat{k}$$

Garis kerja $\vec{F}_R$ berada pada arah sumbu Z negatif dan melalui $\vec{r}'$.

4) Gaya Hidrostatik Pada Permukaan Melengkung



Gaya pada elemen $d\vec{A}$ yang sangat kecil:

$$d\vec{F} = -p d\vec{A}$$

Resultan gaya:

$$\vec{F}_R = - \int_A p d\vec{A}$$

$$\vec{F}_R = \hat{i} \bar{F}_{R_x} + \hat{j} \bar{F}_{R_y} + \hat{k} \bar{F}_{R_z}$$

$$F_{R_x} = \bar{F}_R \cdot \hat{i} = \int dF \cdot \hat{i} = - \int_A p dA \cdot \hat{i} = - \int_A p dA_x = \int dF_x$$

$$F_{R_y} = \bar{F}_R \cdot \hat{j} = \int dF \cdot \hat{j} = - \int_A p dA \cdot \hat{j} = - \int_A p dA_y = \int dF_y$$

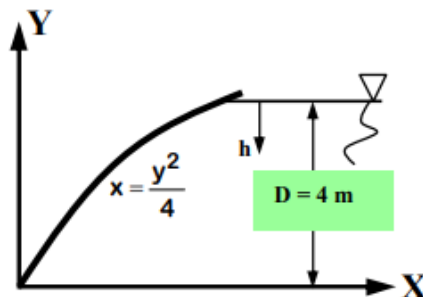
$$F_{R_z} = \bar{F}_R \cdot \hat{k} = \int dF \cdot \hat{k} = - \int_A p dA \cdot \hat{k} = - \int_A p dA_z = \int dF_z$$

$$\begin{aligned} \rightarrow dF_z &= -p dA_z \\ &= -\rho g h dA_z \\ &= -\rho g dV \\ F_z &= -\rho g V \end{aligned}$$

Kesimpulan

- Garis kerja F_R melalui pusat gravitasi volume cairan antara permu melalui pusat gravitasi volume cairan antara permukaan terendam aan terendam dan permukaan bebas cairan.
- Untuk permukaan melengkung, resultan gaya TIDAK dinyatakan sebagai SATU GAYA TUNGGAL, tetapi dalam komponen-komponennya.

Contoh Soal

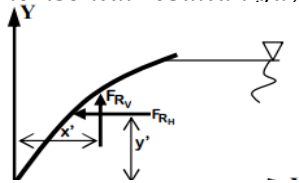


Pintu air mempunyai lebar $w = 5 \text{ m}$. Persamaan permukaan lengkung pintu air tersebut $x = \frac{y^2}{4}$, kedalaman air $D = 4 \text{ m}$. Hitunglah komponen horizontal dan vertikal resultan gaya akibat tekanan fluida dan garis kerjanya !

Penyelesaian

F_{R_V} = komponen vertikal resultan gaya

F_{R_H} = komponen horisontal resultan gaya



→ $\vec{F}_R = -\int p \, d\vec{A}$; $dp = \rho g \, dh \rightarrow p = \rho g \, h$; p_{atm} bekerja pada pintu air dan permukaan bebas air, sehingga tak ada selisih tekanan atmosferik.

$$\rightarrow F_{R_H} = \int_0^D p w \, dy ; F_{R_V} = \int_0^{D^2/4} p w \, dx$$

$$\rightarrow x = \frac{y^2}{4} \rightarrow y = \sqrt{4x} = 2\sqrt{x}$$

→ Lihat gambar. Variasi kedalaman air bisa dinyatakan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} F_{R_H} &= \int_0^D p w \, dy = \int_0^D \rho g h w \, dy = \rho g w \int_0^D h \, dy = \rho g w \int_0^D [D - y] \, dy \\ &= \rho g w \left[D y - \frac{y^2}{2} \right]_0^D = \rho g w \left[D^2 - \frac{1}{2} D^2 \right] = \frac{\rho g w D^2}{2} \\ &= 999 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 5 \text{ m} \cdot \frac{16}{2} \text{ m}^2 = 392 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \\ &= 392 \text{ kN} \end{aligned}$$

**Komponen
horisontal gaya**

$$\begin{aligned} F_{R_V} &= \int_0^{D^2/4} p w \, dx = \int_0^{D^2/4} \rho g h w \, dx = \rho g w \int_0^{D^2/4} h \, dx \\ &= \rho g w \int_0^{D^2/4} [D - 2\sqrt{x}] \, dx = \rho g w \left[D x - 2 \cdot \frac{2}{3} \cdot x^{3/2} \right]_0^{D^2/4} \\ &= \rho g w \left[\frac{D^3}{4} - \frac{4}{3} \cdot \frac{D^3}{4^{3/2}} \right] = \frac{\rho g w D^3}{12} \\ &= 999 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 5 \text{ m} \cdot 64 \text{ m}^3 \cdot \frac{1}{12} = 261.34 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \\ &= 261.34 \text{ kN} \end{aligned}$$

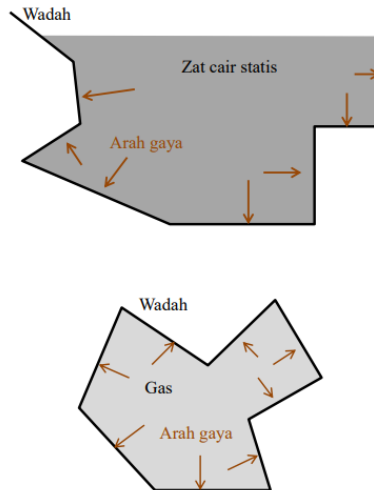
**Komponen vertikal
gaya resultan**

Garis Kerja F_{R_H}

$$\begin{aligned}
 y' &= \frac{1}{F_{R_H}} \int_{A_x} y p dA = \frac{1}{F_{R_H}} \int_0^D y p w dy = \frac{1}{F_{R_H}} \int_0^D y \rho g h w dy \\
 &= \frac{\rho g w}{F_{R_H}} \int_0^D y [D - y] dy = \frac{\rho g w}{F_{R_H}} \left[\frac{Dy^2}{2} - \frac{y^3}{3} \right]_0^D \\
 &= \frac{\rho g w D^3}{6 F_{R_H}} = \frac{\rho g w D^3}{6} \cdot \frac{1}{F_{R_H}} = \frac{\rho g w D^3}{6} \cdot \frac{2}{\rho g w D^2} = \frac{D}{3} = \frac{4}{3} \text{ m} = 1.33 \text{ m} \\
 x' &= \frac{1}{F_{R_v}} \int_{A_y} x p dA_y = \frac{1}{F_{R_v}} \int_0^{\frac{D^2}{4}} x \rho g h w dx = \frac{\rho g w}{F_{R_v}} \int_0^{\frac{D^2}{4}} x [D - 2\sqrt{x}] dx = \frac{\rho g w}{F_{R_v}} \left[\frac{D}{2} x^2 - \frac{4}{5} x^{5/2} \right]_0^{\frac{D^2}{4}} \\
 &= \frac{\rho g w D^5}{160 F_{R_v}} = \frac{\rho g w D^5}{160} \cdot \frac{1}{F_{R_v}} = \frac{\rho g w D^5}{160} \cdot \frac{12}{\rho g w D^3} = \frac{3D^2}{40} = \frac{3 \times 16}{40} = 1.2 \text{ m}
 \end{aligned}$$

2. Arah Gaya

Pada bidang persentuhan antara fluida statis dengan benda maka fluida selalu melakukan gaya dorong pada benda. Salah satu sifat yang menarik adalah arah gaya dorong oleh fluida selalu tegak lurus bidang sentuh dengan benda (**Gambar 2.2**).

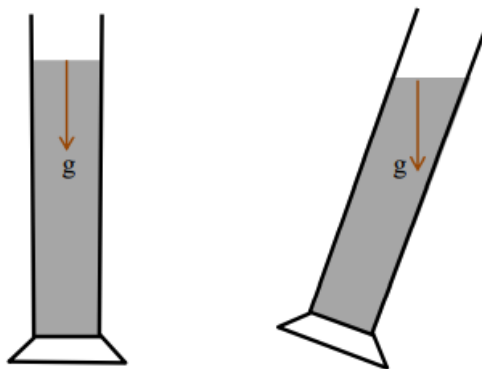


Gambar 2.2 Arah gaya pada permukaan sentuh fluida statis dengan benda selalu tegak lurus permukaan benda

Sifat ini tidak dipenuhi oleh fluida yang mengalir. Fluida yang mengalir dapat melakukan gaya gesekan dengan bidang kontak dengan benda lain. Sebagai contoh, untuk membersihkan bagian dalam benda maka kita masukkan air ke dalam benda lalu air diputar dalam arah menyinggung permukaan benda. Pipa yang tersumbat dapat dibersihkan dengan memberikan aliran air cukup kencang sepanjang pipa. Gaya yang dilakukan fluida searah pipa dapat melepas sumbatan pada pipa.

3. Bentuk Permukaan Fluida Statis

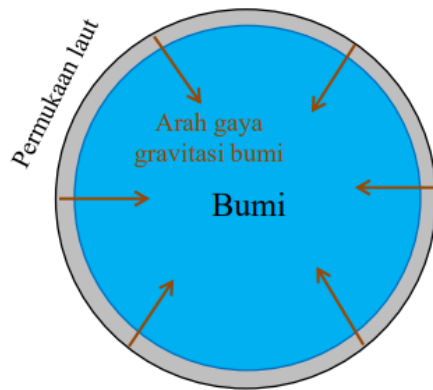
Bagaimana bentuk permukaan fluida, khususnya zat cair? Sifat yang menarik adalah: di bawah pengaruh gaya gravitasi Bumi, bentuk permukaan zat cair statis selalu tegak lurus gaya gravitasi bumi. Karena gaya gravitasi bumi di suatu tempat arahnya ke bawah maka permukaan zat cair statis selalu berbentuk bidang horisontal (**Gambar 2.3**).



Gambar 2.3. Simbol g menyatakan arah gaya gravitasi bumi. Bentuk permukaan zat cair diam selalu tegak lurus arah gaya gravitasi bumi

Jika zat cair tidak statis, maka bentuk permukaan bisa sembarang. Contohnya permukaan zat cair yang sedang bergelombang memiliki bentuk yang tidak tegak lurus arah gaya gravitasi bumi.

Sebagian besar permukaan bumi ditutupi laut. Karena berada di bawah pengaruh gravitasi bumi, maka permukaan air laut tegak lurus gaya gravitasi bumi. Arah gaya gravitasi bumi di berbagai tempat selalu menuju ke pusat bumi. Dengan demikian, permukaan air laut tegak lurus jari-jari bumi, atau sesuai dengan permukaan bola bumi (**Gambar 2.4**).



Gambar 2.4. Bentuk permukaan laut mengikuti bentuk bumi karena harus tegak lurus arah gaya gravitasi bumi. Arah gaya gravitasi bumi selalu menuju ke pusat bumi.

Mengapa permukaan fluida selalu tegak lurus gaya tarik bumi? Karena fluida tidak sanggup menahan gaya yang arahnya sejajar permukaan (arah tangensial). Jika permukaan fluida statis tidak tegak lurus gaya gravitasi bumi, maka ada komponen gaya gravitasi bumi yang sejajar permukaan fluida. Komponen ini dapat menarik fluida dalam arah sejajar permukaan sehingga fluida mengalir. Ini *bertentangan dengan asumsi bahwa fluida adalah statis*. Dengan demikian, agar tidak terjadi aliran maka permukaan fluida harus tegak lurus gaya gravitasi bumi. Jika awalnya permukaan fluida tidak tegak lurus gaya gravitasi bumi, maka fluida akan mengalir hingga permukaannya tegak lurus gaya gravitasi bumi.

Kondisi berbeda terjadi pada fluida yang mengalir. Permukaan fluida tidak harus tegak lurus gaya gravitasi bumi. Contohnya adalah air yang mengalir turun bidang miring.

Permukaan air tidak tegak lurus gaya gravitasi bumi. Air dalam botol lalu dikocok juga memiliki permukaan yang tidak tegak lurus gaya gravitasi bumi. Air gerak atau gelombang bukan fluida statik sehingga permukaannya tidak perlu tegak lurus gaya gravitasi bumi.

4. Massa Jenis

Salah satu besaran fisis fluida yang penting adalah *massa jenis*. *Massa jenis* adalah massa fluida per satuan volum. Untuk fluida yang memiliki volume kecil, massa jenis didefinisikan sebagai :

$$\rho = \frac{m}{V} \dots \dots \dots (2.1)$$

dengan **m** massa fluida, **V** volum fluida, dan **ρ** massa jenis fluida.

Tabel 2.2 Massa jenis sejumlah fluida.

Fluida	Massa Jenis (kg/m³)
Air (pada suhu 4 °C)	1,00 × 10³
Air laut	1,025 × 10³
Air raksa	13,6 × 10³
Alkohol	0,79 × 10³
Bensin	0,68 × 10³
Udara (0 °C, 1 atm)	1,29
Helium (0 °C, 1 atm)	0,179
Karbon dioksida (0 °C, 1 atm)	1,98
Uap air (100 °C, 1 atm)	0,598
Asam asetat	1,049 × 10³
aseton	0,785 × 10³

Fluida dengan volume satu gelas, satu ember, bahkan satu kolam dapat ditentukan massa jenisnya dengan persamaan (2.1). Namun, jika volume fluida sangat besar, misalnya *dam*, lautan, atau atmosfer, maka *massa jenis* fluida *tidak sama* di setiap tempat. Contohnya pada lautan, *massa jenis* makin besar jika *masuk makin ke dalam*. Pada atmsofer, *massa jenis* makin kecil jika *makin jauh dari permukaan bumi*. Oleh karena itu, *definisi umum massa jenis fluida* adalah

$$\rho(r) = \frac{dm}{dV} \dots \dots \dots (2.2)$$

Lalu.... Bagaimana dengan Massa Jenis Campuran Fluida?

Untuk menjawab pertanyaan ini, perhatikan penjelasan di bawah ini.

Jika beberapa fluida yang memiliki massa jenis berbeda dicampur, maka massa jenis campuran fluida merupakan harga rata-rata massa jenis fluida yang dicampur tersebut. Berapa massa jenis rata-rata tersebut? Misalkan kita mencampur N buah fluida dengan massa jenis rata-rata masing-masing $(\rho_1), (\rho_2), \dots, (\rho_N)$ dan volum masing-masing $V_1, V_2, \dots, V_N$. Massa masing-masing fluida tersebut adalah $m_1 = (\rho_1)V_1, m_2 = (\rho_2)V_2, \dots, m_N = (\rho_N)V_N$. Jika N buah fluida tersebut dicampur maka massa jenis rata-rata hasil campuran akan bergantung pada volum total hasil pencampuran. Jika fluida tidak mengalami perubahan volum setelah pencampuran maka massa jenis rata-rata adalah

$$\bar{\rho} = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_N}{V_1 + V_2 + \dots + V_N}$$

$$\bar{\rho} = \frac{\bar{\rho}_1 V_1 + \bar{\rho}_2 V_2 + \dots + \bar{\rho}_N V_N}{V_1 + V_2 + \dots + V_N} \dots \dots \dots (2.3)$$

Jika volum fluida setelah dicampur lebih kecil dari jumlah volum fluida mula-mula, maka massa jenis rata-rata lebih besar daripada yang diungkapkan oleh persamaan (2.3). Sebaliknya, jika volum hasil campuran lebih besar daripada jumlah volum fluida mula-mula maka massa jenis campuran lebih kecil dari yang diungkapkan oleh persamaan (2.3).

Contoh Soal

Air dan alkohol masing-masing dengan volum 100 mL dan 300 mL dicampur. Jika dianggap tidak ada perubahan volum selama pencampuran, berapa massa jenis rata-rata hasil pencampuran?

Penyelesaian

Dari **Tabel 2.2**, kita peroleh $\rho_1 = 1000 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ g/mL}$ dan $\rho_2 = 790 \text{ kg/m}^3 = 0,79 \text{ g/mL}$. Massa jenis rata-rata campuran adalah

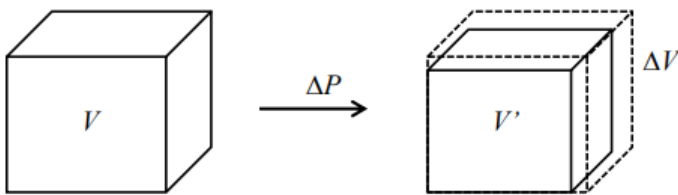
$$\bar{\rho} = \frac{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2}{V_1 + V_2}$$
$$\bar{\rho} = \frac{(1 \times 100) + (0,79 \times 300)}{100 + 300} = 0,843 \frac{\text{g}}{\text{mL}} = 843 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

5. Modulus Bulk dan Kompresibilitas

Modulus bulk mengukur ketahanan fluida terhadap tekanan. Makin kuat fluida mempertahankan volume awal ketika mendapat tekanan maka *modulus bulk* fluida makin besar. Untuk menentukan persamaan modulus bulk, mari kita lakukan percobaan berikut ini.

Perhatikan **Gambar 2.5**. Fluida yang memiliki volume V diberi tambahan tekanan ΔP . Akibatnya fluida mengalami perubahan volume ΔV . Makin besar tambahan tekanan yang diberikan maka makin besar perubahan volume yang terjadi. Jadi kita dapat menduga bahwa perubahan volume berbanding lurus dengan perubahan tekanan yang diberikan, atau

$$\Delta V \propto \Delta P$$



Gambar 2.5 Fluida yang memiliki volume V diberi tambahan tekanan ΔP sehingga mengalami perubahan volume ΔV

Kita juga akan mengamati bahwa jika volume awal makin besar maka perubahan volume juga makin besar. Kita dapat melakukan percobaan dengan menekan busa yang berukuran besar dan ukuran kecil. Kita akan amati, bahwa dengan

tekanan yang sama maka busa yang besar akan mengalami perubahan volume lebih besar. Jadi bisa kita simpulkan bahwa perubahan volume sebanding dengan volume awal, atau

$$\Delta V \propto V$$

Dari dua kesimpulan tersebut kita dapatkan kesimpulan umum bahwa perubahan volume sebanding dengan volume awal dan tambahan tekanan yang diberikan, atau

$$\Delta V \propto V \Delta P$$

Dari kesebandingan terakhir maka kita dapat membuat persamaan dengan menambahkan faktor pengali atau konstanta. Persamaan yang kita dapatkan adalah

$$\Delta V = -\frac{1}{B} V \Delta P \dots\dots\dots (2.4)$$

Tanda negatif diberikan karena volume mengecil jika diberikan tambahan tekanan. Ini berakibat bahwa konstanta yang kita berikan bertanda positif.

Persamaan (2.4) dapat ditulis ulang sebagai

$$B = -V \frac{\Delta P}{\Delta V} \dots\dots\dots (2.5)$$

Konstanta **B** dikenal dengan *modulus bulk* fluida. **Tabel 2.3** adalah data *modulus bulk* sejumlah zat cair.

Tabel 2.3 Modulus bulk dan kompresibilitas sejumlah fluida

Fluida	Modulus bulk (× 10 ⁹ Pa)	Kompresibilitas (× 10 ⁻⁹ Pa ⁻¹)
Aseton	0,92	1,07
Benzena	1,05	0,95
Gliserin	6,31	0,16
Minyak tanah	1,9	0,53
Raksa	41,4	0,02
Oli SAE 30	2,2	0,45
Air laut	3,39	0,29
Asam sulfat	4,3	0,23
air	3,12	0,32
metanol	0,823	1,22
udara	1,4 × 10 ⁻⁴	7.143

Kemudian ada besaran lain yang mendefinisikan perubahan volume fluida ketika mengalami perubahan tekanan. Besaran tersebut dinamakan *kompresibilitas*. *Kompresibilitas* mengukur kemudahan perubahan volum fluida

jika diberi tekanan. Jika fluida berupa gas maka tekanan dapat mengubah volume gas dengan mudah. Kita katakan gas merupakan fluida yang *kompresibel*.

Kompresibilitas berlawanan dengan *modulus bulk*. Kalau *modulus bulk* mengukur berapa kuat fluida tidak mengalami perubahan volum. Sedangkan *kompresibilitas* mengukur berapa mudah fluida mengalami perubahan volume. Dari definisi ini maka *kompresibilitas* memenuhi persamaan

$$k = \frac{1}{B} \dots \dots (2.6)$$

Nilai *kompresibilitas* sejumlah fluida juga tampak pada **Tabel 2.3**.

6. Tekanan Hidrostatik

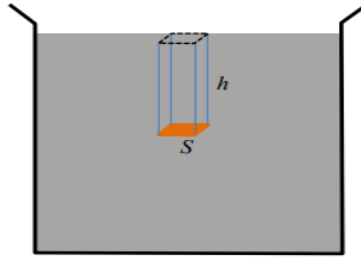
Sifat menarik yang dimiliki zat cair statis adalah adanya tekanan yang dilakukan pada benda yang dicelupkan ke dalam zat cair tersebut. Tekanan tersebut muncul karena benda menahan berat zat cair di atasnya. Makin dalam posisi benda maka makin tebal zat cair di atas benda tersebut yang harus ditahan sehingga makin besar tekanan yang dirasakan benda. Tekan jenis ini dinamakan tekanan *hidrostatik* (tekanan oleh zat cair yang diam).

Sekarang kita coba mencari persamaan tekanan *hidrostatik*. Perhatikan **Gambar 2.6**. Sebuah pelat dengan luas **S** ditempatkan horisontal ke dalam zat cair. Pelat tersebut berada pada kedalaman **h** dari permukaan zat cair. Pelat tersebut menahan beban zat cair di atasnya. Volum zat cair di atas pelat adalah **V = hS**. Jika **ρ** adalah massa jenis zat cair, maka massa zat cair yang berada di atas pelat adalah **m = ρV = ρhS**. Dengan demikian, berat zat cair yang ditahan pelat adalah **W = mg = ρhSg**. Tekanan zat cair yang dialami pelat menjadi,

$$P = \frac{W}{S} = \rho g h \dots \dots (2.7)$$

Dengan **P** adalah tekanan oleh zat cair (**Pa**); **ρ** adalah massa jenis zat cair (**kg/m³**); **g** adalah percepatan gravitasi bumi (**m/s²**);

h adalah kedalaman posisi benda diukur dari permukaan zat cair (m).



Gambar 2.6 Sebuah pelat yang dicelupkan ke dalam zat cair menahan berat zat cair di atasnya. Karena pelat memiliki luas penampang S maka pelat merasakan adanya tekanan yang dihasilkan zat cair. Tekanan jenis ini dinamakan tekanan hidrostatik (*hirdo* = air, *statis* = diam).

Tekanan hidrostatik yang tertuang dalam persamaan (2.7) adalah tekanan yang semata-mata dihasilkan oleh zat cair yang diam.

Contoh Soal

Kapal pesiar Oasis of the Seas memiliki panjang 361 meter dan lebar 47 meter (**Gambar 2.7**). Bagian dasar kapal berada pada kedalaman 9,3 meter dari permukaan laut. Perkirakan gaya yang dialami kapal akibat tekanan hidrostatik air laut dengan asumsi massa jenis air laut kira-kira sama dengan massa air, yaitu 1.000 kg/m^3 .

Penyelesaian

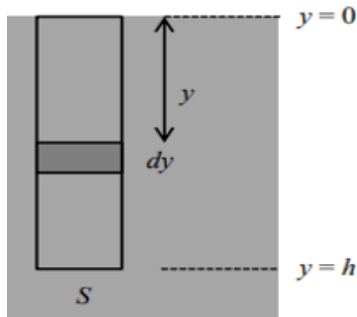
Lambung kapal menerima tekanan hidrostatik dari seluruh bagian permukaan yang tercelup. Tekanan tersebut menghasilkan gaya yang tegak lurus permukaan. Gaya dari permukaan kiri dan kanan saling meniadakan. Begitu pula gaya dari permukaan depan dan belakang saling meniadakan. Yang tetap ada adalah gaya oleh air laut dari arah bawah.

Tekanan hidrostatik di permukaan bawah kapal adalah $P = \rho gh = 1.000 \times 10 \times 9,3 = 93.000 \text{ Pa}$. Luas permukaan bawah kapal kira-kira $A = \text{panjang} \times \text{lebar} = 361 \times 47 = 16.967 \text{ m}^2$. Dengan demikian gaya pada permukaan bawah kapal oleh air laut kira-kira $F = PA = 93.000 \times 16.967 = 1,58 \times 10^9 \text{ N}$. Gaya ini setara dengan gaya gravitasi pada sebuah benda yang memiliki massa $= 1,58 \times 10^9 \text{ N/g} = 1,58 \times 10^9 \text{ N}/10 \text{ m/s}^2 = 1,58 \times 10^8 \text{ kg} = 158.000 \text{ ton}$. Ini berarti dengan bagian dasar berada pada kedalaman 9,3 meter, kapal tersebut bisa menahan beban total 158.000 ton.



Gambar 2.7 Kapal pesiar Oasis of the Seas yang memiliki 16 lantai. Kapal tersebut memiliki panjang 361 meter dan lebar 47 meter dengan bobot kosong 15.000 ton. Kecepatan pelayaran adalah 22,6 knot.

Jika fluida sangat dalam, misalnya di lautan, maka berat fluida di atas pelat **S** pada **Gambar 2.6** tidak dapat dihitung langsung sebagai perkalian volum dan percepatan gravitasi. Jika fluida sangat dalam, maka massa jenis fluida bisa berubah terhadap kedalaman dan percepatan gravitasi juga berubah terhadap kedalaman. Untuk kondisi ini, berat fluida yang ditahan pelat **S** harus dihitung dengan metode integral. Untuk maksud tersebut, perhatikan **Gambar 2.8**.



Gambar 2.8 Menentukan berat fluida yang ditahan pelat S.

Perhatikan elemen fluida pada kedalaman y dari permukaan. Tebal elemen tersebut adalah dy . Karena luas penampang adalah S maka volum elemen tersebut adalah $dV = S dy$. Dengan demikian, massa elemen tersebut adalah

$$dm = \rho dV$$

$$dm = \rho S dy \dots \dots (2.8)$$

Gaya gravitasi yang dialami elemen tersebut adalah

$$dW = g dm$$

$$dW = \rho g S dy \dots \dots (2.9)$$

Berat fluida yang ditahan pelat S menjadi

$$W = \int_0^h \rho g S dy$$

$$W = S \int_0^h \rho g dy \dots \dots (2.10)$$

Akhirnya tekanan yang ditahan oleh pelat S yang tidak lain merupakan tekanan *hidrostatik* pada kedalaman h adalah

$$P = \frac{W}{S}$$

$$P = \int_0^h \rho g dy \dots \dots (2.11)$$

Contoh Soal

Misalkan massa jenis air laut menurut kedalaman memenuhi persamaan $\rho = \rho_0 + \gamma y$ dengan ρ_0 adalah massa jenis di permukaan, y adalah kedalaman diukur dari permukaan dan γ adalah konstanta yang nilainya cukup kecil. Tentukan tekanan

hidrostasi pada kedalaman **h** dengan asumsi hingga kedalaman tersebut percepatan gravitasi dianggap konstan.

Penyelesaian

Kita dapat langsung menggunakan persamaan (2.11) dengan mengeluarkan **g** dari integral. Kita dapatkan

$$P = g \int_0^h \rho \, dy = g \int_0^h (\rho_o + \gamma y) \, dy$$

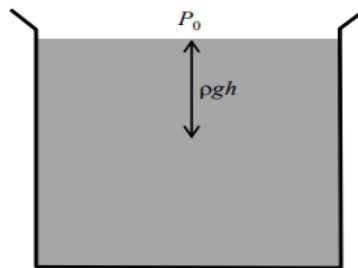
$$P = g \left[\rho_o y + \frac{1}{2} \gamma y^2 \right]_0^h$$

$$P = g \left[\rho_o h + \frac{1}{2} \gamma h^2 \right]$$

Jika di permukaan zat cair sudah ada tekanan, maka tekanan total di dalam zat cair sama dengan jumlah tekanan di permukaan dan tekanan hidrostatis (**Gambar 2.9**). Zat cair terbuka selalu mendapat tekanan atmosfer di permukaannya. Misalnya tekanan atmosfer di permukaan zat cair adalah P_0 maka tekanan di dalam zat cair pada kedalaman h adalah:

**Tekanan Total dalam Fluida = Tekanan Atmosfer +
Tekanan Hidrostatik**

$$P = P_o + \rho g h \dots \dots \dots (2.12)$$



Gambar 2.9. Tekanan total dalam zat cair sama dengan jumlah tekanan di permukaan zat cair dan tekanan hidrostatis.

Tekanan di dalam zat cair persis sama dengan tekanan hidrostatis hanya jika permukaan fluida berupa ruang hampa (divakumkan). ‘

Contoh Soal

Pencarian penumpang pesawat yang jatuh di laut Jawa mengharuskan tim SAR menyelam ke dasar laut hingga kedalaman 37 meter. Jika diasumsikan massa jenis air laut sama dengan massa jenis air biasa (1.000 kg/m^3), berapa tekanan total yang dialami penyelam ketika mencapai dasar laut tersebut

Penyelesaian

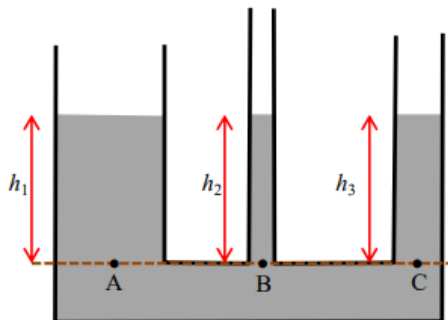
Tekanan hidrostatik di dasar laut adalah $p_{gh} = 1.000 \times 10 \times 37 = 370.000 \text{ Pa}$. Di permukaan laut sudah ada tekanan atmosfer sebesar 100.000 Pa . Maka tekanan total di dasar laut tersebut adalah $370.000 + 100.000 = 470.000 \text{ Pa}$. Tekanan ini sama dengan 4,7 atm.

7. Ketinggian Permukaan Fluida

Sekarang kita akan membahas sejumlah faktor yang menentukan ketinggian permukaan fluida dalam wadah.

7.1. Ketinggian Permukaan Fluida Dalam Bejana Berhubungan

Perhatikan fluida dalam bejana berhubungan dalam **Gambar 2.10**. Pertanyaanya, apakah ketinggian permukaan fluida pada tiap pipa bejana selalu sama? Atau berbeda-beda bergantung pada ukuran pipa? Mari kita selidiki.



Gambar 2.10. Fluida dimasukkan ke dalam bejana berhubungan. Mulut bejana memiliki ukuran yang berbeda-beda. Apakah ketinggian permukaan fluida berbeda-beda atau sama.

Perhatikan garis horisontal tepat di dasar semua pipa vertikal. Tekanan hidrostatik di titik A, B, dan C adalah $P_A = \rho gh_1$, $P_B = \rho gh_2$, dan $P_C = \rho gh_3$. Jika salah satu tekanan lebih besar dari yang lain maka tekanan tersebut mendorong fluida ke lokasi yang bertekanan rendah. Jadi akan terjadi aliran fluida dari lokasi yang bertekanan tinggi ke lokasi yang bertekanan rendah. Ini bertentangan dengan sifat zat cair statis yang diam. Jadi, agar fluida tetap diam maka tekanan di A, B, dan C harus sama. Ini hanya mungkin terjadi jika ketinggian fluida pada semua pipa tegak sama ($h_1 = h_2 = h_3$). Kesimpulan kita adalah:

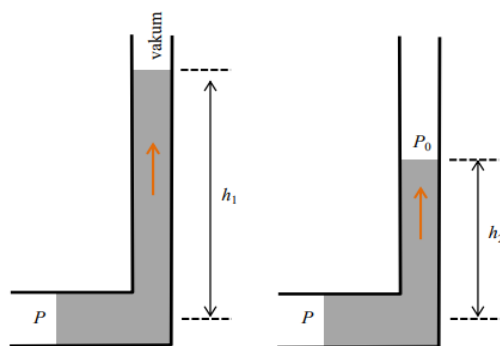
“Ketinggian permukaan fluida statis dalam bejana berhubungan selalu sama”.

7.2. Ketinggian Dorongan pada Fluida

Jika kita memberikan tekanan pada fluida melalui kolom atau pipa, berapa ketinggian fluida yang dapat dihasilkan?

Jika di permukaan atas fluida adalah ruang hampa (**Gambar 2.11 kiri**) maka tekanan dorong dari bawah mengangkat zat cair sehingga fluida dalam pipa menghasilkan tekanan hidrostatik yang persis sama dengan tekanan dorong dari bawah. Persamaan yang dipenuhi adalah

$$P = \rho gh_1 \text{ atau } h_1 = \frac{P}{\rho g} \dots \dots \dots (2.13)$$



Gambar 2.11. Gambar kiri, tekanan P mendorong zat cair ke atas. Di atas permukaan fluida kondisinya vakum. Gambar kanan, tekanan P mendorong zat cair ke atas tetapi di permukaan atas fluida ada tekanan P_0 .

Jika di permukaan atas zat cair telah ada tekanan P_0 (**Gambar 2.11 kanan**) maka tekanan di dasar zat cair menjadi $P_0 + \rho g h_2$. Kenaikan zat cair adalah sedemikian sehingga tekanan total di dasar persis sama dekanan dorongan yang diberikan. Dengan demikian, $P = P_0 + \rho g h_2$ atau

$$h_2 = \frac{P - P_0}{\rho g} \dots \dots \dots (2.14)$$

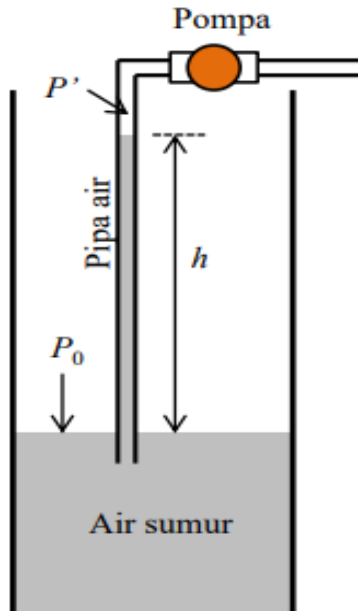
Contoh Soal

Pada pompa air ada data yang dinamakan *discharge head*. *Discharge head* artinya adalah ketinggian maksimum air yang dapat didorong pompa. Setiap pompa air, disamping memiliki kemampuan menyedot air (*suction head*) juga memiliki kemampuan mendorong air (*discharge head*). Jika sebuah pompa memiliki *discharge head* 21 meter, berapakah tekanan dorong yang dihasilkan pompa? Gunakan $\text{atm} = 100.000 \text{ Pa}$.

Penyelesaian

Informasi dari soal adalah pompa sanggup mendorong air hingga ketinggian 21 meter. Dan air yang didorong tersebut berada di bawah pengaruh tekanan atmosfer. Dengan demikian, tekanan dorong yang dihasilkan pompa dapat dihitung menggunakan persamaan (2.12) dan kita dapatkan $P = P_0 + \rho g h = 100.000 + 1.000 \times 10 \times 21 = 310.000 \text{ Pa} = 3,1 \text{ atm}$.

Ada pertanyaan yang menarik, Berapa Kedalaman Maksimum Sumur sehingga air dapat ditarik oleh pompa air? Mungkin ada yang menduga bahwa makin besar daya pompa maka makin dalam air yang bisa ditarik oleh pompa. Ini pendapat yang keliru. **Kedalamam air yang dapat diangkat pompa tidak bergantung pada daya listrik pompa.** Daya listrik yang besar hanya berarti mampu menarik air dengan debit lebih besar, tetapi kedalaman maksimum air yang dapat disedot tetap sama.

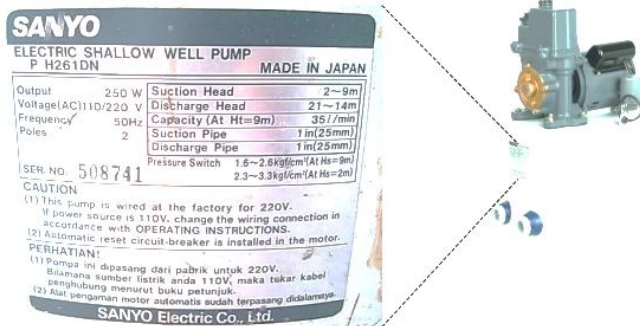


Gambar 2.12. Skema pengangkatan air sumur oleh pompa air. Fungsi pompa air adalah memvakumkan udara di ujung atas pipa sehingga air dalam sumur terdesak menaiki pipa.

Perhatikan **Gambar 2.12.** Sumur yang dilengkapi pompa air mengandung pipa yang tidak boleh bocor (udara pun tidak boleh masuk). Satu ujung pipa tercelup dalam air sumur dan ujung atas pipa dihubungkan dengan pompa. Prinsip penyedotan air adalah pompa menurunkan tekanan udara di ujung atas pipa. Permukaan air sumur sendiri mendapat tekanan dari atmosfer. Jika tekanan di ujung atas pipa menurun maka tekanan atmosfer di permukaan sumur mendesak air naik sepanjang pipa. Berapa ketinggian naiknya air?

Misalkan tekanan di ujung atas pipa yang dihasilkan pompa adalah P' . Maka tinggi naiknya air dalam pipa memenuhi persamaan (2.12), yaitu

$$h = \frac{P_0 - P'}{\rho g} \dots \dots \dots (2.15)$$



Gambar 2.13. Contoh pompa air dan spesifikasi yang tertera di badan pompa.

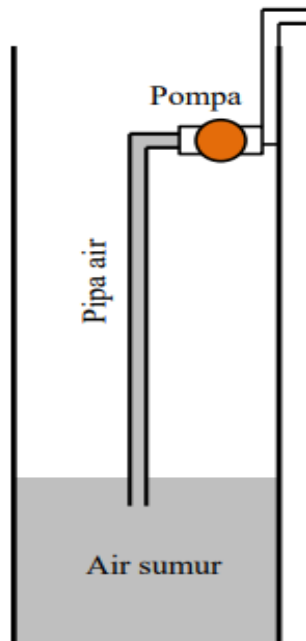
(jualelektronik.com).

Output 250 W artinya daya listrik yang digunakan pompa adalah 250 watt. Voltage (AC) 110/220 V artinya pompa dapat bekerja pada tegangan listrik PLN 110 volt atau 220 volt. Frekuensi 50Hz artinya pompa bekerja pada frekuensi listrik AC 50 Hz. PLN menggunakan frekuensi 50 Hz. Suction Head 2 – 9 m artinya pompa dapat menyedot air pada kedalaman 2 – 9 meter dari posisi pompa. Discharge Head 21 – 14m artinya pompa dapat mendorong air yang disedot hingga ketinggian 21 sampai 14 meter. Jika pompa menyedot dari kedalaman 2 meter maka pompa dapat mendorong hingga ketinggian 21 meter. Tetapi jika pompa menyedot dari kedalaman 9 meter maka pompa dapat mendorong air hingga ketinggian 14 meter. Capacity (At Ht = 9) 35 liter/min artinya pompa dapat menyedot air pada kedalam 9 meter dengan kapasitas 35 liter tiap menit. Suction Pipe 1 in(25 mm) artinya pipa penyedotan memiliki ukuran 1 inci. Discharge Pipe 1 in(25 mm) artinya pipa dorongan air dari pompa memiliki ukuran 1 inci

Pompa terbaik adalah yang sanggup menghasilkan kondisi vakum di ujung atas pipa. Jika kondisi ini dapat dicapai maka air akan naik dengan ketinggian maksimum. Jika ujung atas pipa berada dalam keadaan vakum maka $P' = 0$ sehingga ketinggian maksimum air naik di pipa adalah

$$h_{maks} = \frac{P_o}{\rho g} \dots \dots \dots (2.16)$$

Dengan menggunakan data $P_0 = 1 \text{ atm} = 1,01 \times 10^5 \text{ Pa}$, $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$, dan $g = 9,82 \text{ m/s}^2$ maka kita dapatkan $h_{maks} = 10,28 \text{ m}$. Namun ini adalah kondisi ideal. Tidak ada pompa air yang benar-benar sanggup memvakumkan ujung atas pipa sehingga ketinggian air yang dapat disedot pompa lebih kecil dari itu. Kebanyakan pompa yang dijual di pasar memberikan data kedalaman maksimum permukaan sumur yang bisa disedot adalah 9 meter (**Gambar 2.13**).



Gambar 2.14. Posisi pompa jika permukaan air sumur terlalu dalam. Posisi pompa diturunkan sehingga jaraknya dari permukaan air sumur kurang dari 9 meter.

Jika sumur terlalu dalam sehingga permukaan air sumur dari tanah jaraknya lebih dari 9 meter maka cara yang digunakan untuk menyedot air sumur adalah menurunkan posisi pompa lebih rendah dari permukaan tanah (**Gambar**

2.14). Dengan demikian, jarak pompa dari permukaan air sumur tidak lebih dari 9 meter.

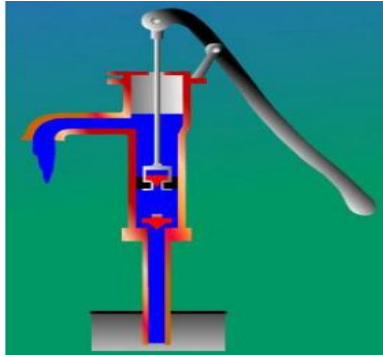
Prinsip kerja pompa air persis sama dengan prinsip kita minum menggunakan sedotan (**Gambar 2.15**). Ketika kita menyedot minuman sebenarnya yang kita lakukan adalah mengosongkan udara di dalam sedotan. Akibat tekanan udara yang rendah dalam sedotan maka minuman dalam gelas didesak oleh atmosfer sehingga bergerak naik sepanjang sedotan dan akhirnya mencapai mulut.



Gambar 2.15. Ketika kita menyedot minuman maka yang kita lakukan adalah mengosongkan udara di dalam sedotan sehingga minuman dalam gelas terdesak ke atas akibat tekanan atmosfer (kesehatan.kompasiana.com).

Contoh Soal

1. Pompa air yang digerakkan dengan tangan (**Gambar 2.16**) hanya sanggup menghasilkan penurunan tekanan setengah atmosfer di ujung atas pipa. Berapakah kedalaman maksimum air yang dapat disedot dengan pompa tangan tersebut. Gunakan data $1 \text{ atm} = 100.000 \text{ Pa}$.



Gambar 2.16. Pompa air jaman dahulu yang digerakkan dengan tangan. Pompa ini masih bermanfaat untuk daerah yang belum dimasuki jaringan listrik PLN

Penyelesaian

Dari informasi di soal kita peroleh, $P_0 = 1 \text{ atm} = 100.000 \text{ Pa}$ dan $P' = \frac{P_0}{2} = 50.000 \text{ Pa}$. Kedalaman air yang dapat disedot dihitung dengan persamaan (2.15), yaitu

$$h = \frac{P_0 - P'}{\rho g} = \frac{100.000 - 50.000}{1.000 \times 10} = 5 \text{ meter.}$$

2. Di sebuah restoran kalian memesan jus jambu. Massa jenis jus jambu sekitar $1,3 \text{ g/cm}^3$. Kalian minum jus menggunakan sedotan yang panjangnya 15 cm . Berapakah maksimal tekanan udara dalam mulut agar jus dapat naik melalui sedotan hingga ke dalam mulut?

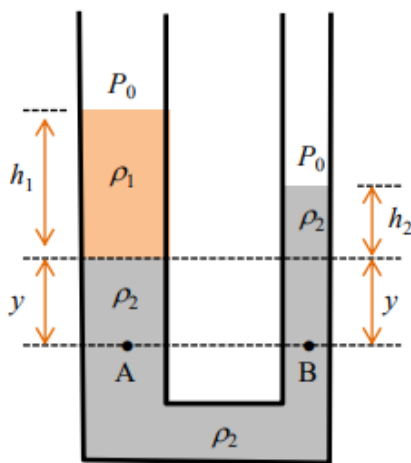
Penyelesaian

Massa jenis jus $\rho = 1,3 \text{ g/cm}^3 = 1.300 \text{ kg/m}^3$. Dengan menggunakan persamaan (2.15) tekanan maksimal udara dalam mulut agar jus dapat naik sampai ke mulut adalah

$$P' = P_0 - \rho gh = 100.000 - 1.300 \times 10 \times 0,15 = 98.050 \text{ Pa.}$$

Nah... Sekarang... Bagaimana Jika Dua Zat Cair dalam Pipa U? Untuk menjawab pertanyaan ini, marilah kita ikuti penjelasan di bawah ini.

Sifat zat cair yang menghasilkan tekanan *hidrostatik* dapat digunakan untuk menentukan massa jenis zat cair lain jika massa jenis suatu zat cair sudah diketahui (zat cair referensi). Syaratnya adalah zat cair yang akan diukur massa jenisnya tidak boleh tercampur dengan zat cair referensi. Contohnya adalah air dengan minyak. Metode pengukuran adalah menggunakan pipa berbentuk huruf U seperti pada **Gambar 2.17**.



Gambar 2.17. Zat cair yang berbeda dimasukkan ke dalam pipa U. Zat cair dianggap tidak bercampur (selalu membentuk fase terpisah). Contoh zat cair yang tidak tercampur adalah minyak dan air. Contoh zat cair yang tercampur adalah air dan sirup. Jika massa jenis zat cair berbeda maka ketinggian permukaan zat cair di dua ujung tabung berbeda.

Prinsip yang harus dipahami adalah pada ketinggian yang sama, tekanan di dalam zat cair yang sama adalah sama. Pada **Gambar 2.17** titik **A** dan **B** memiliki ketinggian yang sama dan berada dalam zat cair yang sama. Dengan demikian, tekanan di titik **A** dan **B** persis sama.

Tekanan di titik A = tekanan di permukaan zat cair + tekanan zat cair setinggi h_1 dan tekanan zat cair setinggi y

$$P_A = P_o + \rho_1 g h_1 + \rho_2 g y$$

Tekanan di titik **B** = tekanan di permukaan zat cair + tekanan zat cair 2 setinggi h_2 + tekanan zat cair 2 setinggi y

$$P_B = P_o + \rho_2 g h_2 + \rho_2 g y$$

Karena $P_A = P_B$, maka

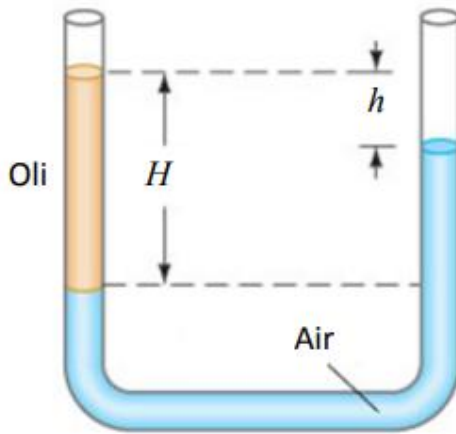
$$P_o + \rho_1 g h_1 + \rho_2 g y = P_o + \rho_2 g h_2 + \rho_2 g y$$

Akhirnya kita dapatkan persamaan

$$\rho_1 h_1 = \rho_2 h_2 \dots \dots (2.17)$$

Contoh Soal

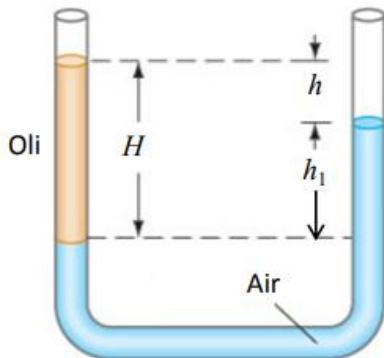
Air dan sejenis oli yang tidak bercampur dengan air dimasukkan ke dalam bejana berhubungan. Dalam kondisi setimbang, posisi air dan oli tampak pada **Gambar 2.18**. Pengukuran dengan mistar menghasilkan $H = 15 \text{ cm}$ dan $h = 2 \text{ cm}$. Dengan menggunakan massa jenis air 1.000 kg/m^3 , berapakah massa jenis oli?



Gambar 2.18 Gambar untuk contoh soal

Penyelesaian

Untuk menggunakan persamaan (2.17) kita gambar ulang sebagai berikut,



Kalau menggunakan persamaan (2.17) maka kita dapatkan,

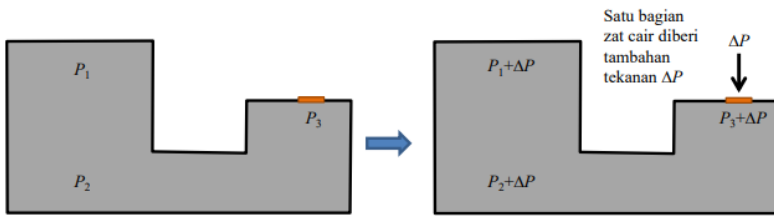
$$\rho_{\text{minyak}} H = \rho_{\text{air}} h_1$$

Berdasarkan gambar di atas kita dapatkan $h_1 = H - h = 15 - 2 = 13$ cm. Dengan demikian $\rho_{\text{minyak}} \times 15 = 1.000 \times 13$, atau $\rho_{\text{minyak}} = 13.000/15 = 867$ kg/m³.

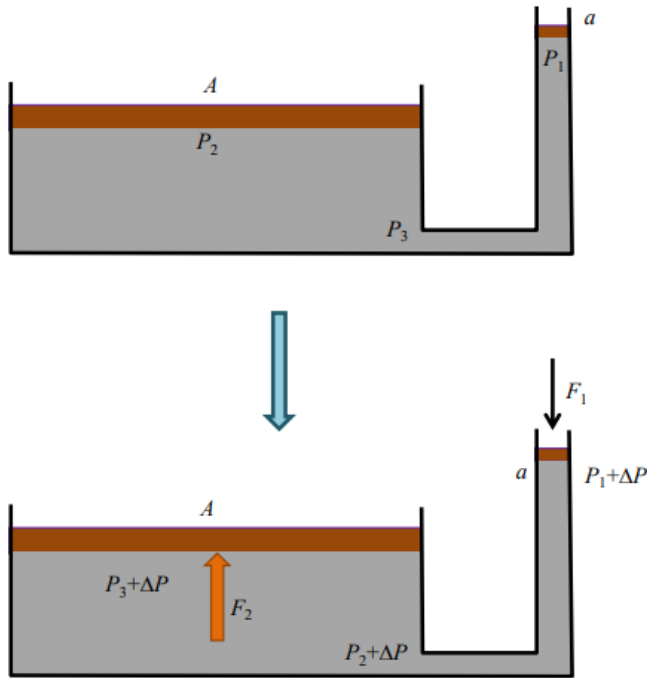
8. Hukum Pascal

Misalkan zat cair dimasukkan dalam wadah tertutup. Jika satu bagian zat cair tersebut mengalami penambahan tekanan, maka seluruh bagian zat cair mengalami penambahan tekanan yang besarnya persis sama (**Gambar 2.19**). Ini adalah pernyataan *Hukum Pascal* untuk fluida statis.

Salah satu aplikasi utama Hukum Pascal adalah pembuatan dongkrak hidrolik atau penggerak hidrolik lainnya. Keuntungan dongkrak atau penggerak hidrolik adalah hanya dengan gaya kecil kita sanggup menggerakkan benda yang massanya sangat besar. Bagaimana menjelaskannya? Perhatikan **Gambar 2.20**.



Gambar 2.19. Ketika satuan bagian dalam fluida tertutup mendapat tambahan tekanan ΔP maka seluruh bagian fluida mendapat tambahan ΔP juga.



Gambar 2.20. Jika tekanan di satu bagian dalam zat cair yang berada di dalam wadah tertutup ditambah, maka seluruh bagian zat cair mendapat tambahan tekanan yang sama besar. Tekanan di penampang kecil ditambah sebesar ΔP . Akibatnya, semua bagian zat cair mendapat tambahan tekanan sebesar ΔP pula

Pada **Gambar 2.20** zat cair ditampung dalam wadah tertutup yang memiliki dua silinder terbuka dengan luas

penampang berbeda jauh. Masingmasing silinder dilengkapi dengan piston. Mula-mula tekanan dalam zat cair di bawah piston kecil adalah P_1 , tekanan zat cair di bawah piston besar adalah P_2 , tekanan di tempat lain dalam zat cair adalah P_3 , dan seterusnya.

Sekarang kita berikan gaya F_1 pada piston kecil. Luas penampang piston kecil adalah a . Dengan demikian tambahan tekanan di bawah piston kecil akibat gaya tersebut adalah $\Delta P = \frac{F_1}{a}$. Berdasarkan hukum Pascal, maka seluruh bagian di dalam zat cair mengalami tambahan tekanan yang sama sebesar ΔP . Zat cair di bawah piston besar juga mendapat tambahan tekanan sebesar ΔP . Tambahan tekanan di bawah piston besar menghasilkan gaya F_2 yang memenuhi $F_2 = \Delta P A$. Akhirnya kita dapatkan $F_2 = (\frac{F_1}{a})A$ atau

$$F_2 = \frac{A}{a} F_1 \dots \dots \dots (2.18)$$

dengan,

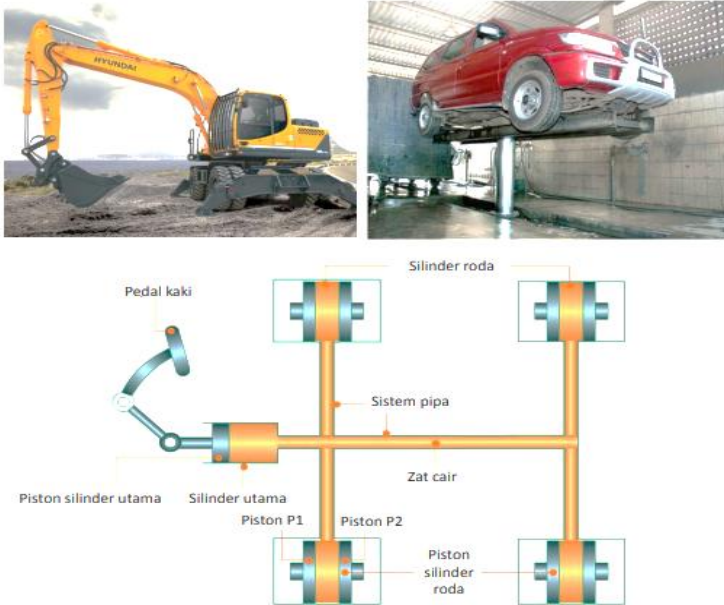
F_1 adalah gaya yang diberikan pada piston kecil (N)

F_2 adalah gaya yang dihasilkan di piston besar (N)

A adalah luas penampang piston besar (m^2)

a adalah luas penampang piston kecil (m^2)

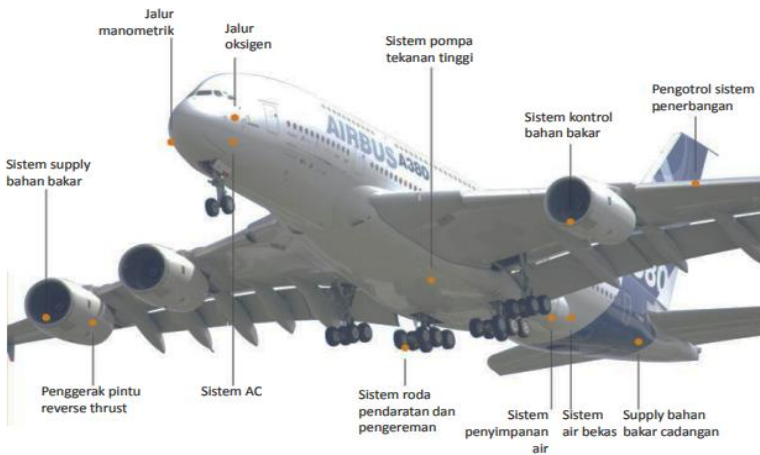
Persamaan (2.18) menginformasikan ke kita bahwa dengan membuat ukuran piston besar jauh lebih besar daripada ukuran piston kecil maka kita dapat menghasilkan gaya yang sangat besar pada piston besar hanya dengan pemberian gaya yang kecil pada piston kecil. Sebagai contoh, untuk $\frac{A}{a} = 800$, maka dengan $F_1 = 15$ N kita menghasilkan $F_2 = 12.000$ N. Gaya 15 N sama dengan berat benda yang bermassa 1,5 kg. Gaya 12.000 N kira-kira seberat mobil Avanza. Jadi, dengan gaya yang setara berat benda 1,5 kg yang diberikan di piston kecil kita dapat mengangkat mobil Avanza dengan mudah.



Gambar 2.21. Sejumlah aplikasi hukum Pascal yang dapat kita jumpai sehari-hari: (kiri atas) escavator, (kanan atas) dongkrak hidrolik, dan (bawah) sistem pengereman kendaraan (constructionequipment.hyundai.eu, pakethidrolikcucimobil.blogspot.com)

Gambar 2.21 adalah contoh aplikasi *hukum Pascal*. Semua penggerak *hidrolik* memanfaatkan hukum pascal. Dengan hukum *pascal* maka benda yang berat dapat digerakkan dengan gaya tidak terlalu besar. Pada kebanyakan mobil saat ini, hampir semua sistem pengereman menggunakan sistem hidrolik. Dengan sedikit injakan pada pedal rem, maka mobil dapat dihentikan dengan mudah walaupun sedang melaju pada kecepatan tinggi. Termasuk mobil dengan bobot besar seperti mobil kontainer.

Saat ini sistem hidrolik mulai luas digunakan dalam pesawat-pesawat terbaru. **Gambar 2.22** adalah contoh sistem *hidrolik* yang digunakan pada pesawat *Airbus A380*. Pesawat ini merupakan pesawat komersial terbesar yang ada saat ini. Pesawat ini dapat mengangkut hingga 850 orang penumpang.



Gambar 2.22. Contoh sistem hidrolik pada pesawat Airbus A380. Pesawat ini adalah pesawat komersial terbesar saat ini
(www.finetubes.co.uk)

Contoh Soal

Dongkrak hidrolik pada tempat cuci mobil memiliki pipa (piston) pengangkat yang memiliki jari-jari 10 cm. Pipa tersebut didorong oleh sejenis oli. Oli dalam pipa dihubungkan dengan kompresor gas. Gas dari kompresor tersebut yang memberi tambahan tekanan pada oli sehingga dapat menaikkan dan menurunkan kendaraan yang dicuci. Berapakah tekanan gas dalam kompresor agar dapat mengangkat mobil yang memiliki massa 1.000 kg?

Penyelesaian

Luas penampang pipa pengangkat mobil adalah $A_1 = \pi \times (0,1)^2 = 0,01\pi$. Gaya yang harus ditahan pipa dongkrak sama dengan berat mobil, yaitu $F_1 = W_{\text{mobil}} = m_{\text{mobil}} g = 1.100 \times 10 = 11.000 \text{ N}$. Untuk menghasilkan gaya tersebut dibutuhkan tambahan tekanan $\Delta P = F_2/A_2 = 11.000/0,01\pi = 11.000/(0,01 \times 3,14) = 350.318 \text{ Pa}$. Tambahan tekanan tersebut berasal dari udara dalam kompresor. Dengan demikian, kompresor harus memberikan tambahan tekanan sebesar 350.318 Pa. Karena mobil sendiri mendapat tekanan dari

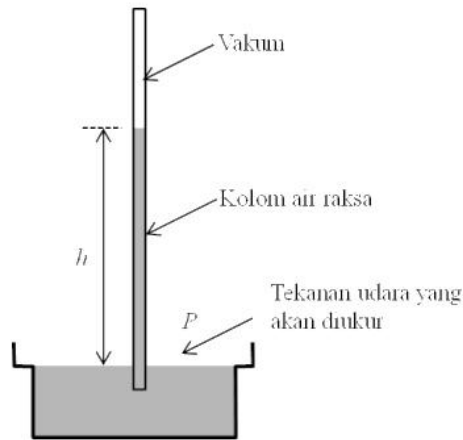
atmosfer sebesar 100.000 Pa, maka tekanan dalam kompresor haruslah $350.318 + 100.000 = 450.318$ Pa.

9. Barometer

Barometer adalah alat yang digunakan untuk mengukur tekanan udara, baik di atas maupun di permukaan laut. Pertama kali alat ini ditemukan oleh Ilmuwan asal Italia, *Evangelista Torricelli* pada tahun 1643. Ini termasuk penemuan besar karena dapat digunakan untuk membantu berbagai macam pekerjaan, hingga saat ini.

Barometer merupakan instrumen ilmiah yang digunakan untuk mengukur tekanan atmosfer, atau disebut juga dengan tekanan barometrik. Atmosfer adalah lapisan udara yang membungkus bumi. Selanjutnya, udara memiliki berat dan menekan semua yang disentuh saat gravitasi menariknya ke Bumi. Hingga kini, barometer banyak digunakan di berbagai bidang. Fungsi barometer ini sering digunakan untuk memperkirakan cuaca, kalibrasi dan pemeriksaan barometer aneroid, mengukur tekanan di dalam pesawat, menyiapkan barograf, menyiapkan altimeter pesawat, hingga digunakan untuk menganalisis cuaca permukaan. Tidak salah jika barometer disebut sebagai penemuan brilian yang mampu memberikan beragam manfaat dalam kehidupan.

Salah satu contoh barometer adalah barometer air raksa. Barometer ini memanfaatkan prinsip tekanan hidrostatik pada air raksa. **Gambar 2.23** adalah barometer air raksa dan skemanya. Bagian utama barometer ini adalah wadah air raksa, pipa gelas vertikal yang tertutup ujung atasnya dan dalam keadaan vakum.



Gambar 2.23. (kiri) Contoh barometer air raksa (patrickmarney.co.uk). (kanan) Skema barometer air raksa. Terdapat wadah penampungan air raksa dan pipa kecil yang dicelupkan terbalik secara vertikal (bagian terbuka tercelup di dalam air raksa dan bagian tertutup di sisi atas). Pipa divakumkan. Air raksa dalam wadah ditekan oleh udara luar sehingga terdesak naik sepanjang pipa

Karena ujung atas kolom adalah vakum maka ketinggian kolom memenuhi

$$P = \rho_r g h$$

dengan, ρ_r adalah massa jenis air raksa; g adalah percepatan gravitasi bumi; h adalah ketinggian kolom air raksa.

Pipa gelas diberi skala dan tiap skala diberi angka tekanan yang diukur. Jika barometer dibawa ke permukaan laut maka tekanan udara $P = 1 \text{ atm} = 1,01 \times 10^5 \text{ Pa}$. Dengan menggunakan data massa jenis air raksa $\rho_r = 13.600 \text{ kg/m}^3$ maka ketinggian kolom air raksa adalah

$$h = \frac{P}{\rho_r g} = \frac{1,01 \times 10^5}{13.600 \times 9,82} = 0,76 \text{ m}$$

Jadi ketinggian kolom air raksa pada barometer ketika mengukur tekanan 1 atm adalah $0,76 \text{ m} = 76 \text{ cm}$. Oleh karena itu, tekanan 1 atm kadang disebut tekanan 76 cmHg. Artinya

tekanan yang menyebabkan kolom air raksa barometer naik setinggi 76 cm. Jika tekanan di suatu tempat adalah 60 cmHg maka dalam satuan atmosfer tekanan tersebut adalah $(60/76) \times 1 \text{ atm} = 0,79 \text{ atm}$.

Bisakah menggunakan air sebagai zat cair dalam barometer? Massa jenis air adalah 1.000 kg/m^3 . Jika digunakan mengukur tekanan 1 atm maka ketinggian kolom air adalah $1,01 \times 10^5 / (1.000 \times 9,82) = 10,28 \text{ meter}$! Jadi, jika menggunakan air sebagai zat cair maka tinggi kolom barometer harus lebih dari 10 meter ! Tentu tidak praktis bukan?

Contoh Soal

Jika barometer air raksa dibawa ke puncak gunung Tambora yang memiliki ketinggian 2.850 meter dari permukaan laut, berapakah tinggi kolom air raksa dalam barometer? Gunakan massa jenis udara 1 kg/m^3 dan massa jenis air raksa 13.600 kg/m^3 .

Penyelesaian

Tekanan hidrostatik udara setebal 2.850 meter adalah

$\rho_{\text{udara}} g h = 1 \times 10 \times 2.850 = 28.500 \text{ Pa}$. Tekanan udara di permukaan laut adalah $1 \text{ atm} = 100.000 \text{ Pa}$. Tekanan di puncak Tambora sama dengan tekanan di permukaan laut dikurang tekanan hidrostatik udara setebal 2.850 m, yaitu $P = 100.000 - 28.500 = 71.500 \text{ Pa}$. Ketinggian kolom air raksa dalam barometer adalah

$$h = \frac{P}{\rho_r g} = \frac{71.500}{13.600 \times 10} = 53 \text{ cm}$$

10. Gaya Angkat Archimedes

Jika ada sebuah batu di udara, kita akan kesulitan atau bahkan tidak sanggup untuk mengangkat batu tersebut. Tetapi ketika di dalam air, batu yang sama kadang dapat kita angkat dengan mudah. Di udara, sebuah benda yang dilepas akan jatuh hingga ke tanah. Tetapi ketika dimasukkan ke air sebagian benda malah diam di permukaan air (terapung). Kita

melihat kapal-kapal raksasa yang terbuat dari baja terapung di laut (**Gambar 2.24**).

Mengapa benda yang begitu berat bisa terapung? Mengapa benda ketika di udara sangat berat, namun ketika dimasukkan dalam air menjadi begitu ringan? Jawabnya adalah *zat cair menghasilkan gaya angkat pada benda yang tercelup di dalamnya*.

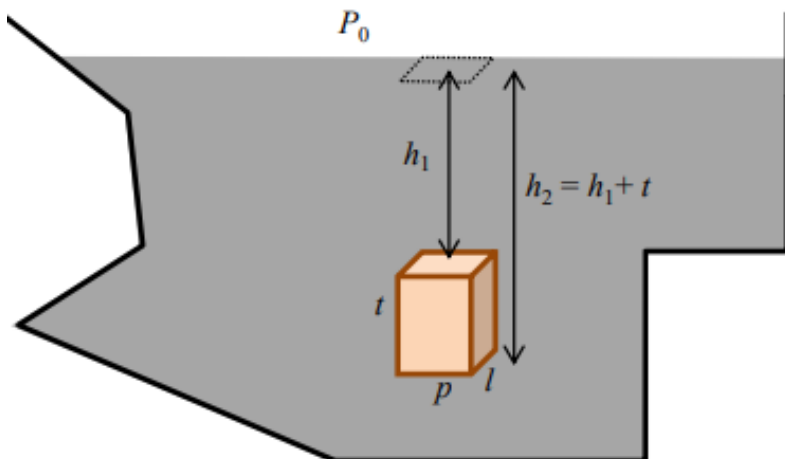


Gambar 2.24. Kapal terbesar yang ada saat ini adalah Maersk Triple-E. Kapal ini memiliki panjang 400 meter, lebar 59 meter, dan kapasitas 18.000 TEU, artinya dapat mengangkut 18.000 kontainer. Kapal ini memiliki kecepatan maksimum 23 knots. Tinggi kapal diukur dari permukaan laut adalah 73 meter. Kedalaman yang tercelup dalam air adalah 14,5 meter

Berapakah Besarnya... Gaya Angkat oleh Zait Cair?
Untuk menjawab pertanyaan ini, marilah kita tentukan persamaannya terlebih dahulu.

Misalkan sebuah balok dengan panjang sisi p , l , dan t dicelupkan ke dalam zat cair (**Gambar 2.25**). Permukaan atas balok berada pada kedalaman h_1 dan permukaan bawahnya berada pada kedalaman $h_2 = h_1 + t$. Untuk menentukan gaya angkat kita hanya perlu memperhitungkan gaya yang bekerja pada permukaan atas dan bawah balok. Permukaan kiri, kanan, depan, dan belakang hanya menghasilkan gaya arah horisontal sehingga tidak memberi kontribusi pada gaya angkat. Bisa juga

kita buktikan bahwa resultan gaya dalam arah horisontal adalah nol.



Gambar 2.25. Benda berbentuk balok yang dicelupkan ke dalam zat cair. Benda mendapat tekanan hidrostatik dari berbagai sisi. Perkalian tekanan dengan luas menghasilkan gaya. Jadi, ada gaya yang bekerja pada tiap sisi benda. Jumlah semua gaya tersebut menghasilkan gaya netto ke atas. Inilah yang disebut gaya angkat Archimedes.

Tekanan total pada permukaan atas balok adalah $P_1 = P_0 + \rho g h_1$. Tekanan total pada permukaan bawah balok adalah $P_2 = P_0 + \rho g (h_1 + t)$. Luas permukaan atas dan permukaan bawah balok sama, yaitu $A = p l$. Dengan demikian gaya ke arah bawah pada permukaan atas balok adalah $F_1 = P_1 A = (P_0 + \rho g h_1) p l$. Gaya ke arah atas pada permukaan bawah balok adalah $F_2 = P_2 A = (P_0 + \rho g h_1 + \rho g t) p l$. Gaya netto ke atas yang bekerja pada balok adalah

$$F_A = F_2 - F_1$$

$$F_A = (P_0 + \rho g h_1 + \rho g t) p l - (P_0 + \rho g h_1) p l$$

$$F_A = \rho g (p l t)$$

Karena $V_b = p l t$ yaitu volum balok. Dengan demikian, gaya angkat pada balok menjadi :

$$F_A = \rho g V_b \dots \dots \dots (2.19)$$

dengan ρ adalah massa jenis zat cair (kg/m^3), g adalah percepatan gravitasi bumi (m/s^2), dan V_b adalah volume bagian benda yang tercelup (m^3).

Gaya angkat oleh zat cair dikenal juga dengan gaya angkat Archimedes karena pertama kali dirumuskan oleh Archimedes. Dari persamaan (2.19) tampak jelas bahwa gaya angkat Archimedes sama dengan berat zat cair yang dipindahkan oleh bagian benda yang tercelup. Gaya angkat Archimedes maksimum jika seluruh bagian benda tercelup ke dalam zat cair.

Contoh Soal 1

Misalnya masa tubuh kamu adalah 48 kg. Ketika mandi di kolam rendang, kamu merasakan tubuh menjadi ringan. Dan memang, jika saat dalam air kamu menggelantung di neraca terbaca massa tubuh kamu menjadi ringan. Misalkan skala neraca menunjukkan angka 25. Berapakah gaya angkat *Archimedes* pada tubuh kamu? Berapa volume tubuh kamu yang tercelup dalam air saat penimbangan? Gunakan massa jenis air 1.000 kg/m^3 .

Penyelesaian

Berat tubuh kamu saat di luar adalah $m_1 g = 48 \times 10 = 480 \text{ N}$. Berat tubuh kamu saat penimbangan dalam air adalah $m_2 g = 25 \times 10 = 250 \text{ N}$. Perbedaan berat ini disebabkan oleh adanya gaya angkat *Archimedes*. Jadi gaya angkat *Archimedes* adalah $F_A = 480 - 250 = 230 \text{ N}$.

Jumlah air yang dipindahkan tubuh sama dengan volume bagian tubuh yang tercelup. Gaya angkat *Archimedes* sama dengan berat zat cair yang dipindahna, atau $F_A = m_a g =$

$(\rho_a V_c) g$ dengan V_c adalah volume bagian tubuh yang tercelup. Jadi

$$V_c = \frac{F_A}{\rho_a g} = \frac{230}{1000 \times 10} = 0,023 \text{ m}^3$$

Contoh Soal 2

Sebuah benda terapung di danau. Setelah diamati ternyata hanya seperempat bagian benda yang ada di permukaan air sedangkan $3/4$ ada di dalam air. Berdasarkan data tersebut, berapakah massa jenis benda?

Penyelesaian

Kita misalkan massa jenis benda adalah ρ_b dan volumenya adalah V . Massa benda adalah $m_b = \rho_b V$ dan berat benda adalah $W_b = m_b g = \rho_b V g$. Volume benda yang tercelup adalah $V' = \frac{3}{4} V$. Dengan demikian gaya angkat Archimedes pada benda adalah $F_A = \rho_a V' g = \frac{3}{4} V \rho_a g$.

Untuk benda yang terapung tidak ada gaya netto yang bekerja. Gaya angkat Archimedes persis sama dengan berat benda sehingga $W_b = F_A$ atau

$$\rho_b V g = \frac{3}{4} \rho_a V g$$

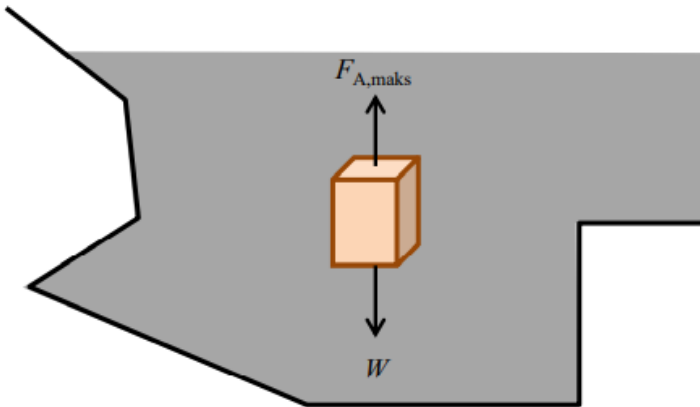
$$\rho_b = \frac{3}{4} \rho_a = \frac{3}{4} 1000 = 750 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

11. Tenggelam, Melayang, dan Terapung

Ketika benda dimasukkan dalam zat cair maka ada dua gaya arah vertikal yang bekerja pada benda. Gaya pertama adalah berat benda yang arahnya ke bawah. Gaya kedua adalah gaya angkat Archimedes yang arahnya ke atas. Berdasarkan perbandingan kekuatan gaya tersebut maka kita akan mengamati tiga fenomena ketika memasukkan benda dalam zat

cair, yaitu tenggelam, melayang, dan terapung. Apa syarat agar benda tenggelam, melayang, atau terapung?

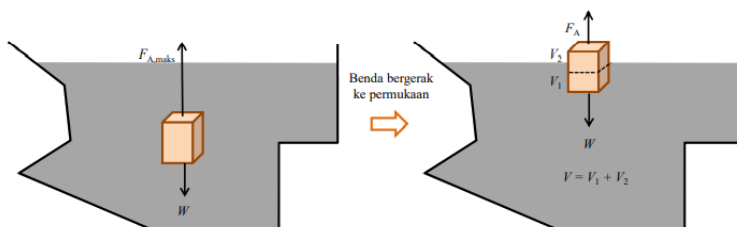
Untuk mengetahui kondisi mana yang akan terjadi, bayangkan kita mencelupkan seluruh bagian benda ke dalam zat cair (**Gambar 2.26**). Benda akan mengalami gaya angkat maksimum. Misalkan volume benda adalah V dan massa benda adalah m . Berat benda adalah $W = m g$. Gaya angkat maksimum yang dialami benda jika seluruh volume benda tercelup ke dalam zat cair adalah $F_{A maks} = \rho_c g V_b$, dimana ρ_c adalah massa jenis zat cair.



Gambar 2.26. Setiap benda yang berada dalam zat cair selalu mendapat dua gaya. Gaya angkat Archimenes dan gaya gravitasi. Kekuatan masing-masing gaya tersebut yang menentukan benda terapung, melayang, atau tenggelam.

- a) Benda tenggelam jika berat benda lebih besar daripada gaya angkat maksimum: $m g > \rho_c g V_b$ atau $m > \rho_c V_b$
- b) Benda melayang jika berat benda sama dengan gaya angkat maksimum: $m g = \rho_c g V_b$ atau $m = \rho_c V_b$
- c) Benda terapung jika berat benda lebih kecil daripada gaya angkat maksimum: $m g < \rho_c g V_b$ atau $m < \rho_c V_b$

Khusus untuk benda terapung, ketika seluruh bagian benda dicelupkan ke dalam zat cair, maka gaya angkat Archimedes lebih besar daripada berat benda. Jika dilepas, maka benda akan bergerak ke atas hingga sebagian volume benda muncul di permukaan cairan hingga tercapai kesetimbangan (**Gambar 2.27**).



Gambar 2.27. Jika gaya angkat maksimum lebih kecil dari berat benda, maka di manapun posisi awal benda diletakkan pada akhirnya benda akan terapung

Pada kondisi setimbang, gaya angkat *Archimedes* sama dengan berat benda. Misalkan saat tercapai kesetimbangan volume bagian benda yang tercelup adalah V_1 , maka gaya angkat *Archimedes* adalah $F_A = \rho_c g V_1$. Saat tercapai kesetimbangan maka $m g = \rho_c g V_1$ atau

$$m = \rho_c V_1$$

Atau volume benda yang tercelup adalah

$$V_1 = \frac{m}{\rho_c}$$

Volum benda yang muncul di permukaan zat cair adalah

$$V_2 = V - V_1$$

Salah satu teknologi canggih yang memanfaatkan prinsip melayang, mengapung, dan tenggelam adalah teknologi kapal selam. Kapal selam memiliki ruang khusus penampung air. Jumlah air yang ditampung bisa ditambah dan dikurangi. Ketika kapal selam akan muncul ke permukaan, maka air dalam ruang tersebut dikeluarkan sehingga berat kapal selam

berkurang. Gaya angkat *Archimedes* mengungguli berat sehingga kapal selam naik ke permukaan. Jika kapal selam ingin turun ke dalam air maka air dalam ruang tersebut ditambah sehingga berat kapal selam meningkat. Jika berat melampaui gaya angkat *Archimedes*, maka kapal selam turun masuk ke dalam air. Saat kapal selam akan bergerak maju, maka kapal selam harus dalam kondisi melayang. *Ruang diisi air sedekimian rupa sehingga gaya angkat Archimedes persis sama dengan massa kapal selam.*

Contoh Soal 1

Mengapa korban tenggelam mula-mula jasadnya masuk ke dalam air lalu beberapa hari kemudian akan muncul di permukaan?

Penyelesaian

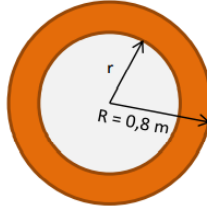
Massa jenis tubuh manusia sedikit lebih besar daripada massa jenis air. Dengan demikian, orang yang meninggal karena tenggelam jasadnya akan masuk ke dalam air. Setelah beberapa hari jasad membengkak sehingga volumenya membesar. Karena massa jasad tidak berubah maka massa jenis menjadi mengecil. Ketika massa jenis menjadi lebih kecil dari massa jenis air maka jasad akan naik dan mengapung.

Contoh Soal 2

Sebuah bola besi memiliki jari-jari 80 cm. Di dalam bola besi terdapat rongga yang berbentuk bola juga. Ketika dimasukkan ke dalam air ternyata bola besi tersebut melayang di air. Dari informasi ini, hitung jari-jari rongga dalam bola besi. Massa jenis besi adalah 7.600 kg/m^3 .

Penyelesaian

Perhatikan **Gambar 2.28** di bawah ini.



Gambar 2.28. Gambar Contoh Soal 2.

Volume bola besi yang tercelup dalam air adalah $V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \times 3,14 \times (0,8)^3 = 2,14 \text{ m}^3$. Gaya angkat *Archimedes* pada bola besi adalah $F_A = \rho_a V g = 1.000 \times 2,14 \times 10 = 21.400 \text{ N}$.

Volume material besi saja adalah $V' = \frac{4}{3} \pi R^3 - \frac{4}{3} \pi r^3 = 2,14 - \frac{4}{3} \times 3,14 \times r^3 = 2,14 - 4,19r^3$. Massa material besi saja, $m_b = \rho_b V' = 7.600 \times (2,14 - 4,19r^3)$. Berat bola besi, $W_b = m_b g = 7.600 \times (2,14 - 4,19r^3) \times 10 = 76.000 \times (2,14 - 4,19r^3)$.

Karena bola besi melayang, maka $W_b = F_A$ atau $76.000 \times (2,14 - 4,19r^3) = 21.400$ atau $2,14 - 4,19r^3 = \frac{21.400}{76.000} = 0,28$. Dengan demikian, $4,19r^3 = 2,14 - 0,28 = 1,86$ atau $r^3 = \frac{1,86}{4,19} = 0,444$. Akhirnya kita dapatkan jari-jari rongga bola besi adalah $r = (0,444)^{\frac{1}{3}} = 0,76 \text{ m} = 76 \text{ cm}$.

Penasaran... Bagaimana Sich.. Mekanika Gaya Apung?

Untuk menghilangkan rasa penasaran tentang Mekanika Gaya Apung, marilah kita ikuti penjelasan di bawah ini.

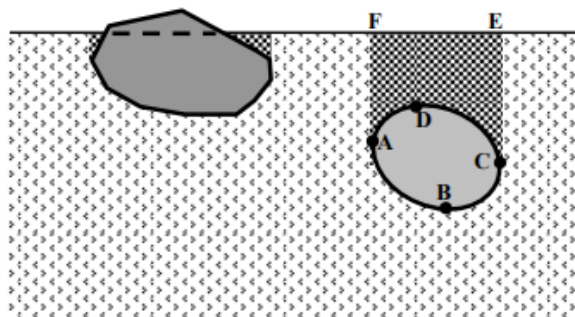
Kalau suatu benda atau permukaan yang terendam dalam atmosfer maka gaya-gaya akibat tekanan atmosfer akan bekerja padanya. Kalau suatu benda terendam dalam air maka gaya hidrostatis akibat kedalaman air akan bekerja terhadap benda tersebut. Tinbul pertanyaan, Bagaimana dengan benda yang

terapung? Bagaimana sebuah kapal berukuran raksasa terbuat dari logam bisa terapung? Apakah kapal itu menerima gaya hidrostatis dari air tempatnya mengapung?

Gaya apung adalah resultan gaya yang bekerja terhadap suatu benda oleh fluida statik tempat benda itu terendam atau terapung, dan Gaya apung beraksi vertikal ke atas.

Pada benda yang terendam, **gaya apung** sama dengan **beda antara komponen vertikal gaya tekanan terhadap sisi bawah benda dan komponen vertikal gaya tekanan terhadap sisi atas benda.**

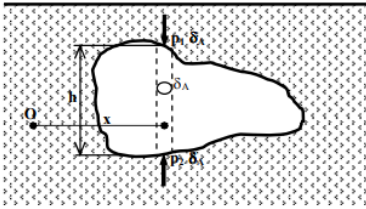
Perhatikan **Gambar 2.29** di bawah.



Gambar 2.29. Sketsa Gaya Apung

Gaya ke atas = berat cairan **ABCEFA**. Gaya ke bawah = berat cairan dalam **ADCEFA**. Beda (selisih) kedua gaya tersebut adalah gaya vertikal ke atas yang disebabkan oleh berat fluida **ABCD** yang dipindahkan oleh benda padat itu.

$$F_B = V \cdot \gamma$$



F_B = Gaya apung

V = Volume yang dipindahkan

γ = Berat jenis fluida

$$\delta F_B = [p_2 - p_1] \delta A = \gamma \cdot h \cdot \delta A = \gamma \cdot \delta V$$

$$F_B = \gamma \int_V dV = \gamma \cdot V$$

$$\gamma \int_V x dV = \gamma V \bar{x} \quad \text{atau} \quad \bar{x} = \frac{1}{V} \int_V x dV$$

$\bar{x}$ = Jarak dari titik acuan ke garis kerja gaya apung (pusat apung)

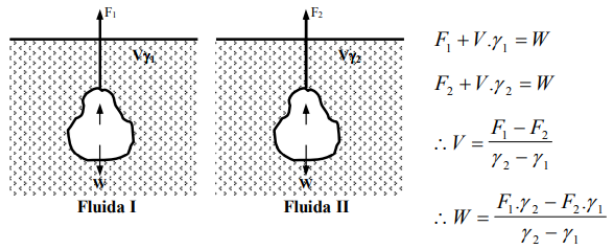
Bahan Diskusi

Bagaimana sebuah kapal induk seberat seratus ribu ton dapat mengapung di atas air? Kita tahu bahwa jika benda itu terbuat dari baja padat maka benda tersebut akan tenggelam, dan kapal induk tidak padat tetapi berongga. Akan tetapi bagaimana air yang berada di bawahnya tahu bahwa kapal induk itu berongga? Harus seberapa ringankah sebuah benda agar dapat mengapung? Dengan menggunakan konsep gaya apung di atas, jawab dengan detail dan diskusikan pertanyaan berikut ini:

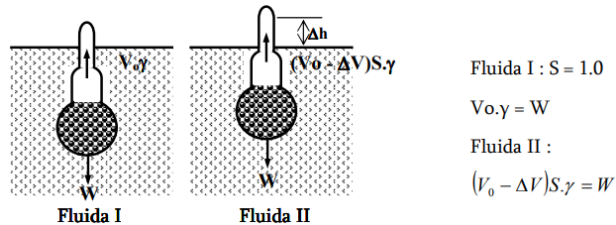
- Mengapa kapal induk seberat itu bisa mengapung?
- Mengapa hanya sebagian badan kapal yang melesak ke dalam air?
- Bagaimana dengan kapal selam yang kadang-kadang tenggelam (menyelam) dan kadang naik (mengapung) ke permukaan? .

Penggunaan Azas Gaya Apung

➤ Menentukan berat / volume benda

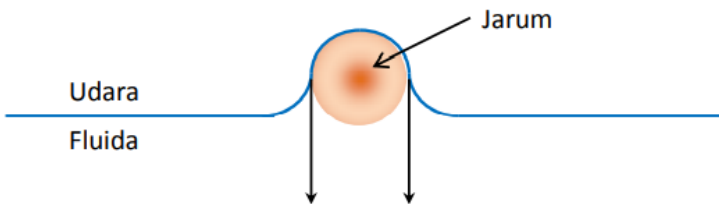


➤ Mengukur gravitasi jenis fluida



12. Tegangan Permukaan

Banyak pengamatan menarik tentang permukaan fluida. Jarum yang diletakkan perlahan-lahan di atas permukaan fluida tetap mengambang asalkan tidak basah meskipun massa jenis jarum lebih besar daripada massa jenis fluida. Pada tempat jarum diletakkan, permukaan fluida sedikit melengkung ke bawah mengikuti kontour permukaan jarum (**Gambar 2.30**). Fenomena ini memperlihatkan bahwa permukaan fluida berperan sangat mirip dengan membran yang direntangkan. Jarum akan masuk tenggelam ke dalam fluida jika permukaan fluida tertusuk, yang mirip dengan robeknya membran.



Gambar 2.30 Jarum terapung di atas permukaan fluida

Karena permukaan fluida mirip dengan membran yang direntangkan, maka permukaan fluida menarik benda pada tepinya dengan gaya yang sejajar permukaan. Contohnya, air yang ada dalam gelas. Pada tempat kontak dengan gelas, permukaan air menarik dinding gelas. Berapakah besar gaya tarik oleh permukaan fluida?

Dari hasil pengamatan, diperoleh bahwa besarnya gaya tarik oleh permukaan fluida pada tempat kontak dengan zat padat adalah

$$F = \gamma L$$

dengan, F adalah gaya oleh permukaan fluida, L adalah panjang garis kontak antara permukaan fluida dengan zat padat, dan γ adalah konstanta yang dikenal dengan tegangan permukaan fluida.

Tegangan permukaan beberapa fluida tampak pada **Tabel 2.4.**

Tabel 2.4. Tegangan permukaan beberapa fluida

Fluida	Tegangan permukaan (N/m)
Air raksa (20 °C)	0,440
Alkohol (20 °C)	0,023
Air (0 °C)	0,076
Air (20 °C)	0,072
Air (100 °C)	0,059
Benzen (20 °C)	0,029
Oksigen cair (-193 °C)	0,016

Contoh Soal

Sebuah kawat kecil yang panjangnya 10 cm dicelupkan ke dalam benzen. Kawat tersebut kemudian diratik perlahan-lahan dalam posisi sejajar keluar dari permukaan benzen. Berapakah gaya oleh permukaan benzen pada kawat, sebelum kawat lepas dari permukaan benzen?

Penyelesaian

Panjang kawat adalah $\ell = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$. Tetapi karena pada masing-masing sisi kawat terdapat lapisan permukaan fluida, maka panjang total permukaan fluida yang kontak dengan kawat adalah

$$L = 2 \times \ell = 2 \times 0,1 \text{ m} = 0,2 \text{ m}.$$

Berdasarkan Tabel 2.1, Tegangan permukaan benzen adalah $\gamma = 0,029 \text{ N/m}$. Dengan demikian gaya yang dilakukan permukaan fluida pada kawat adalah

$$F = \gamma L = 0,029 \times 0,2 = 0,0058 \text{ N}.$$

13. Kelengkungan Permukaan Fluida

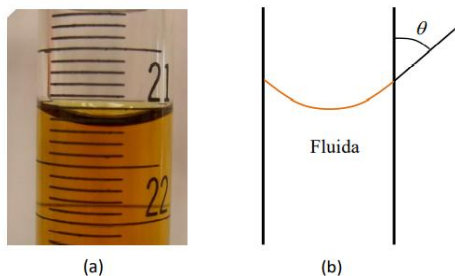
Jika air dimasukkan ke dalam gelas kemudian permukaannya diamati dengan seksama, khususnya pada posisi kontak dengan gelas maka tampak permukaan air sedikit melengkung ke atas. Kelengkungan permukaan tersebut disebabkan karena adanya gaya tarik antara molekul air dengan atom pada permukaan gelas. Jika gaya tarik antara molekul fluida dengan atom pada permukaan zat pada mengungguli gaya tarik antar molekul fluida, maka permukaan fluida pada tempat kontak dengan zat padat sedikit naik. Sebaliknya, jika gaya tarik antara molekul fluida dengan atom pada permukaan zat padat lebih kecil daripada gaya tarik antar molekul fluida, maka permukaan fluida pada tempat kontak dengan zat padat sedikit turun. Gaya tarik antar atom/molekul dari zat yang sama dikenal dengan gaya kohesi. Contohnya adalah gaya tarik antar molekul fluida atau antar atom zat padat. Sebaliknya, gaya tarik antar molekul zat yang berbeda disebut adhesi. Contoh gaya adhesi adalah gaya tarik antara molekul fluida dengan atom pada dinding zat padat.

Ada dua macam bentuk kelengkungan permukaan fluida pada posisi kontak dengan permukaan zat padat.

13.1. Permukaan Cekung

Pada tempat kontak dengan zat padat, permukaan fluida menjauhi fluida. Permukaan cekung terjadi jika gaya adhesi lebih besar daripada gaya kohesi. Contoh permukaan ini adalah air yang dimasukkan ke dalam gelas (**Gambar 2.31**).

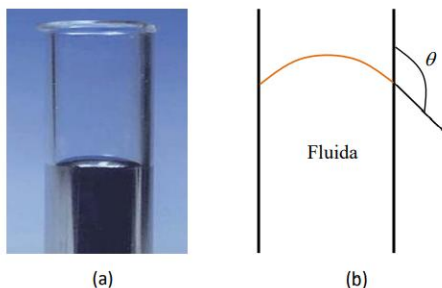
Cairan yang membentuk permukaan cekung dikatakan sebagai “cairan yang membasahi dinding”. Ketika cairan tersebut dibuang dari wadah, dinding tampak basah. Pada tempat kontak dengan dinding, permukaan cairan membentuk sudut θ antara 0 sampai 90° .



Gambar 2.31. Permukaan Cekung

13.2. Permukaan Cembung

Pada tempat kontak dengan zat padat, permukaan fluida mendekati fluida. Permukaan cembung terjadi jika gaya adhesi lebih kecil daripada gaya kohesi. Contoh permukaan ini adalah air raksa yang dimasukkan ke dalam gelas (**Gambar 2.32**).



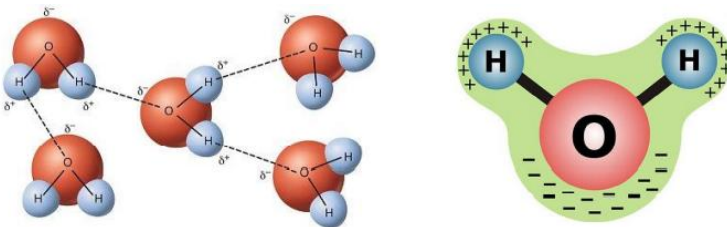
Gambar 2.32. Permukaan Cembung

Cairan yang membentuk permukaan cembung dikatakan sebagai “cairan yang tidak membasahi dinding”. Ketika cairan tersebut dibuang dari wadah, dinding tampak kering. Pada tempat kontak dengan dinding, permukaan cairan membentuk sudut θ antara 90 sampai 180°.

14. Kohesi Dan Adhesi

Molekul-molekul zat cair atau zat padat dapat berkumpul dalam satu kelompok karena adanya gaya antar atom atau molekul zat tersebut. Gaya antar atom atau molekul dari zat yang sama dinamakan **gaya kohesi**. **Gambar 2.33 (kiri)** memperlihatkan gaya kohesi antar molekul.

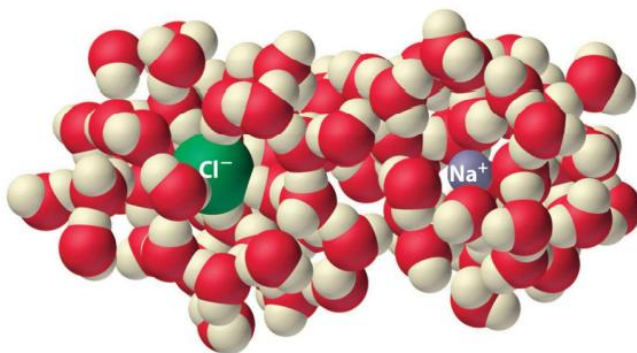
Mengapa muncul gaya kohesi antar molekul air? Penyebabnya adalah muatan listrik pada molekul air tidak tersebar merata. Di sekitar atom hidrogen berkumpul muatan yang sedikit positif sedangkan di sekitar atom oksigen berkumpul muatan yang sedikit negatif (**Gambar 2.33 kanan**). Ketika sejumlah molekul dikumpul, maka muatan positif di sekitar atom hidrogen mengikat muatan negatif di sekitar atom oksigen pada molekul di dekatnya.



Gambar 2.33. (kiri) Gaya kohesi antar molekul air dan (kanan) sebaran muatan listrik pada molekul air tidak merata. Sebaran muatan yang tidak merata ini yang menyebabkan munculnya gaya tarik listrik antar molekul air (socratic.org).

Molekul dari zat yang berbeda juga dapat tarik menarik. Contohnya, ketika garam dilarutkan dalam air, maka molekul garam menarik molekul-molekul air di sekelilingnya. Gaya antara molekul dari zat yang berbeda ini disebut **gaya adhesi**.

Gambar 2.34 adalah ilustrasi gaya adhesi dalam larutan garam dapur (NaCl) dalam air. Ion positif garam (ion Na) menarik atom-atom oksigen pada molekul air dan ion negatif garam (ion Cl) menarik atom-atom hidrogen pada molekul air.



Gambar 2.34. Dalam larutan garam, ion garam dikelilingi oleh molekul air. Ini adalah contoh gaya adhesi(catalog.flatworldknowledge.com)

Air dapat menempel di daun juga karena adanya gaya adhesi antara molekul air dengan molekul di permukaan daun. Seperti diilustrasikan pada **Gambar 2.35**, muatan negatif pada molekul air (atom oksigen) bertarikan dengan molekul di permukaan daun sehingga air menempel di daun.



Gambar 2.35. Muatan negative di permukaan air (atom oksigen) menarik molekul di permukaan daun sehingga air menempel di permukaan daun (chemistryland-com)

15. Tekanan Yang Dilakukan Gas

Berbeda dengan zat cair maupun zat padat, gas selalu memenuhi seluruh ruang dalam wadah. Jika dimasukkan dalam wadah maka molekulmolekul gas cenderung bergerak ke segala arah secara seragam. Oleh karena itu tekanan dalam gas selalu sama di setiap titik.

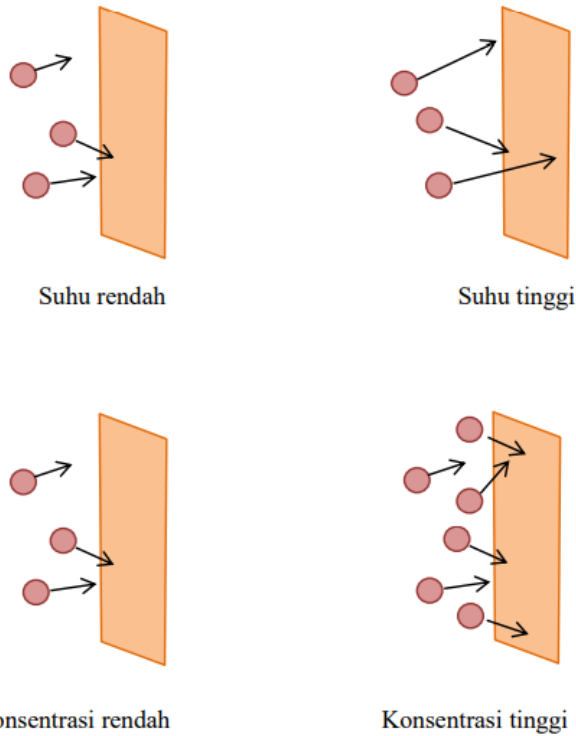
Tekanan gas dihasilkan oleh tumbukan molekul-molekul gas pada benda yang bersentuhan dengan gas. Molekul-molekul gas selalu bergerak secara acak. Ketika mengenai permukaan benda maka molekul tersebut mengalami pemantulan. Pemantulan molekul menghasilkan gaya pada permukaan benda. Karena permukaan benda memiliki luas maka permukaan benda merasakan adanya tekanan.

$$P = \frac{\text{Gaya oleh Molekul} - \text{molekul Gas}}{\text{Luas Permukaan Benda}}$$

Inilah tekanan yang diukur sebagai tekanan gas. Bagaimana persamaan tekanan gas? Mari coba kita turunkan.

- 1) Makin besar besar suhu gas maka makin kencang gerakan molekulmolekul gas (**Gambar 2.36 atas**). Ketika molekul tersebut menumbuk permukaan benda dan dipantulkan maka gaya yang diberikan molekul gas makin besar. Akibatnya tekanan yang dirasakan permukaan benda makin besar. Jadi kita simpulkan bahwa tekanan gas sebanding dengan suhu gas, atau $P \propto T$, dengan T adalah suhu (K).
- 2) Di samping itu, jika dalam wadah tersebut konsentrasi molekul gas makin besar maka makin banyak molekul yang menumbuk permukaan benda (**Gambar 2.36 bawah**). Dengan demikian, gaya total yang dirasakan permukaan benda kibat ditumbuk oleh molekul gas makin besar sehingga tekanan yang dihasilkan makin besar. Oleh karena itu kita sampai pada kesimpulan kedua bahwa tekanan gas berbanding lurus dengan

konsentrasi molekul gas, atau $P \propto n$, dengan n adalah konsentrasi (jumlah molekul per satuan volum).



Gambar 2.36. Jika suhu rendah maka kecepatan molekul kecil sehingga gaya tumbuk molekul pada permukaan benda kecil dan tekanan yang dihasilkan kecil. Jika suhu tinggi maka kecepatan molekul besar sehingga gaya tumbuk molekul pada permukaan benda besar dan tekanan yang dihasilkan besar. Lihat gambar bawah. Jika konsentrasi rendah maka jumlah molekul yang menumbuk dinding sedikit sehingga gaya total tumbukan molekul pada permukaan benda kecil dan tekanan yang dihasilkan kecil. Jika konsentrasi tinggi maka jumlah total molekul yang menumbuk dinding banyak sehingga gaya total tumbukan molekul pada permukaan benda besar dan tekanan yang dihasilkan besar

Jika dua kesebandingan di atas digabung menjadi sebuah persamaan maka kita peroleh tekanan gas memenuhi :

$$P = k n T$$

dengan k adalah konstanta pembanding. Mengingat definisi konsentrasi sebagai jumlah molekul per satuan volum atau $n = N/V$, maka persamaan tekanan gas dapat juga ditulis sebagai,

$$P = \frac{k N T}{V}$$

Hasil percobaan yang sangat teliti menunjukkan nilai konstanta pembanding $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K. Konstanta ini disebut *konstanta Boltzmann*.

Contoh Soal

Pada tekanan udara 1 atm dan suhu 0°C dan volum 22,4 liter, berapakah jumlah atom gas?

Penyelesaian

Tekanan 1 atm yang lebih eksak adalah $P = 1,0133 \times 10^5$ Pa. Suhu gas $T = 0^\circ\text{C} = 273$ K. Volum gas $V = 22,4$ liter $= 22,4 \times 10^{-3} = 2,24 \times 10^{-2}$ m³.

Jadi, jumlah atom gas pada keadaan tersebut adalah

$$N = \frac{P V}{k T} = \frac{1,0133 \cdot 10^5 \times 22,4 \cdot 10^{-3}}{1,38 \cdot 10^{-23} \times 273} = 6,02 \times 10^{23}$$

16. Presto

Presto yang dalam bahasa Inggris disebut *pressure cooker* adalah alat masak tekanan tinggi (**Gambar 2.37**). Udara dalam presto (sebagian besar adalah uap air) dibuat pada tekanan yang tinggi, lebih tinggi dari tekanan atmosfer. Pada tekanan yang lebih tinggi, air mendidih pada suhu yang lebih tinggi. Pada tekanan satu atmosfer, air mendidih pada suhu 100 °C. Akibat tekanan dalam *presto* yang tinggi dari satu atmosfer, maka suhu dalam *presto* lebih tinggi dari pada 100 °C. Ini berarti dengan *presto*, kita dapat memasak makanan pada suhu lebih tinggi sehingga lebih cepat matang.

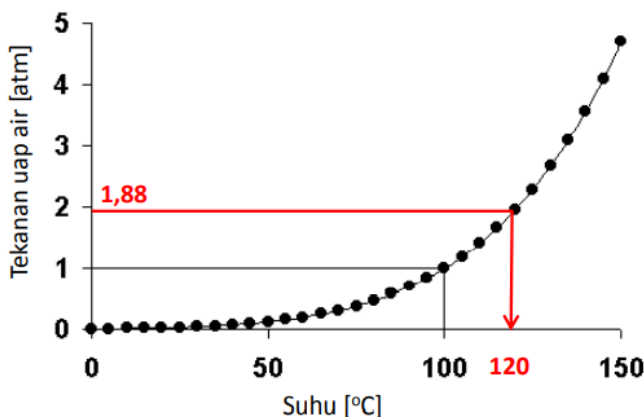


Gambar 2.37. (kiri) Contoh presto dan (kanan) jika tekanan uap di dalam presto maka pembeban di bagian penutup sedikit terangkat sehingga keluar semburan uap sehingga tekanan kembali turun. Mekanisme ini mengontrol agar tekanan dalam presto memiliki batas maksimum



Gambar 2.38. Beban pengontrol tekanan di tutup presto

Mungkin ada yang bertanya, berapakah suhu air dalam presto? Presto memiliki pengontrol tekanan, yaitu sebuah beban yang dipasang di tutup presto. Beban tersebut menutup lubang kecil yang ada di tutup presto. **Gambar 2.38** adalah contoh beban yang dipasang di penutup prestor. Beban tersebut dipasang pada lubang kecil yang berada di tutup presto. Jika tekanan udara di dalam presto terlampaui tinggi maka beban sedikit terangkat sehingga membuka lubang di tutup presto. Akibatnya terjadi semburan uap keluar dari prestor yang menyebabkan tekanan kembali turun.



Gambar 2.39. Grafik Hubungan antara suhu dan tekanan uap air. Pada tekana 1,88 atm (tekana dalam presto), suhu uap air dan air di dalamnya mencapai 120 °C (chem.purdue.edu).

Orang tua kita sebenarnya sudah mengenal *presto* meskipun dalam bentuk yang sederhana. Caranya adalah mereka memberikan pembeban pada tutup panci (**Gambar 2.40**). Kalau tidak ada pembeban maka sedikit saja tekanan dalam panci melampaui tekanan atmosfer maka tutup akan terbuka sehingga uap keluar. Keluarnya uap menyebabkan tekanan di dalam panci kembali turun sama dengan tekanan atmosfer. Tetapi, ketika penutup panci diberi beban pemberat, maka uap di dalam panci perlu menghasilkan tekanan yang tinggi dulu agar dapat membuka penutup panci. Dengan demikian, tekanan yang cukup jauh di atas satu atmosfer dapat dihasilkan sehingga suhu dalam panci lebih tinggi daripada 100 °C.



Gambar 2.40. Presto orang tua kita dulu. Caranya adalah memberi pembeban pada tutup panci (pengeluarantanaman.blogspot.com).

17. Menghitung Luas Patung Arung Palakka (Putra Terbaik Bugis)

Arung Palakka dikenal sebagai sosok yang berjasa dalam memerdekakan rakyat Bugis dan juga sebagai Putra Terbaik dari Tanah Bugis. Arung Palakka merupakan nama gelar yang disematkan kepadanya, yang memiliki nama kecil *La Tenritatta To Unru Daeng Serang*.

Patung Arung Palakka, dapat ditemui di Kota Watanpone Kabupaten Bone (**Gambar 2.41**). Kalau kalian ditanya seseorang untuk menghitung luas seluruh permukaan patung, bagaimana caranya? Sulit bukan? Apalagi mengingat permukaan patung berlekuk-lekuk. Makin banyak dan makin kecil lekukan, tentulah makin sulit menghitung luas permukaan patung tersebut? Adakah cara yang mudah?



Gambar 2.41. Patung Arung Palakka Di Kabupaten Bone Sulawesi Selatan

Salah satu cara yang cerdas adalah menggunakan bola-bola kecil, misalnya kelereng atau bola karet seukuran kelereng. Kumpulkan bola tersebut sebanyak-banyaknya. Hitung jumlah bola yang kalian kumpulkan. Kemudian tempelkan bola-bola tersebut menutup semua permukaan patung. Tidak ada lagi permukaan patung yang terbuka (tidak ditutupi bola). Setelah itu kalian hitung jumlah bola yang tersisa. Dengan demikian, jumlah bola yang sudah ditempel dapat diketahui. Jika luas daerah yang diisi satu bola dapat ditentukan maka jumlah luas permukaan patung yang ditutupi bola bisa dihitung dengan mudah. Cerdas bukan?

Misalkan luas yang ditempati satu kelereng adalah $1,5 \text{ cm}^2$ dan setelah disusun ternyata ada 2.500 kelereng yang menutupi seluruh permukaan patung. Maka luas permukaan patung adalah $2.500 \times 1,5 = 3.750 \text{ cm}^2$.

Dan perlu kalian tahu bahwa metode seperti inilah yang digunakan untuk menghitung luas permukaan partikel-partikel

kecil atau benda yang mengandung pori-pori kecil. Tentu yang digunakan bukan bola, tetapi atom atau molekul. Luas permukaan material dihitung berdasarkan jumlah atom atau molekul gas yang menempel di permukaan tersebut. Luas satu atom atau molekul sudah ada datanya. Jadi, dengan mengetahui jumlah atom atau molekul yang menempel di permukaan material maka luas material dapat dihitung. Metode ini dinamakan metode **BET**, yang merupakan singkatan dari nama *Braunerr*, *Emmet*, dan *Tellet*, sang penemu metode tersebut. Alat **BET** sudah digunakan secara luas dalam penelitian dan industri. **Gambar 2.41** adalah contoh alat **BET**.

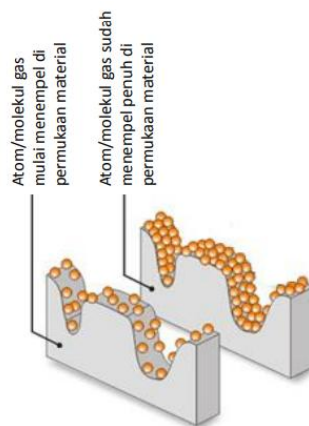
Cara pengukuran dengan **BET** sebagai berikut. Material yang akan diukur luas permukaannya dimasukkan dalam ruang kemudian ruang tersebut divakumkan. Setelah vakum maka gas tertentu dimasukkan ke dalam ruang tersebut dengan tekanan P_0 . Lalu biarkan beberapa lama. Atom atau molekul gas mulai menempel di permukaan material sehingga jumlah atom atau molekul gas yang masih bebas menjadi berkurang. Akibatnya, tekanan gas dalam ruang menjadi berkurang secara perlahan-lahan. Suatu saat tekanan tidak berubah lagi. Pada saat ini seluruh permukaan material sudah ditemplei atom atau molekul gas. Kita ukur tekanan akhir ini. Misalnya didapat P .

Jumlah atom atau molekul yang mula-mula dimasukkan ke dalam ruang adalah

$$N_0 = \frac{P_0 V}{k T}$$

Setelah tekanan tidak berubah lagi maka jumlah atom atau molekul menjadi

$$N = \frac{P V}{k T}$$



Gambar 2.42. (kiri) Salah satu alat BET yang digunakan untuk menentukan luas permukaan material yang berukuran sangat kecil (app-one.com.cn). Dasar kerja alat ini adalah menghitung jumlah atom atau molekul gas yang menempel dan menutupi permukaan material (kanan). Karena luas satu atom atau molekul sudah ada datanya maka luas permukaan material dapat ditentukan

Dengan demikian, jumlah atom atau molekul yang menempel di permukaan material adalah

$$\Delta N = N_0 - N = (P_0 - P) \frac{V}{k T}$$

Jika luas satu atom atau molekul adalah a , maka luas permukaan material adalah $A = \Delta N a$.

Contoh Soal

Molekul nitrogen digunakan untuk menghitung luas total permukaan sejumlah partikel yang berukuran nanometer. Ruang penyimpanan sampel dalam **BET** memiliki ukuran 0,5 liter. Mula-mula tekanan awal nitrogen adalah 2 atm. Setelah dibiarkan cukup lama, nitrogen dalam alat mencapai tekanan konstan 1,9 atm. Suhu pengukuran adalah 27 °C. Perkirakan luas permukaan total partikel-partikel tersebut. Luas satu molekul nitrogen adalah 0,162 nm² dan konstanta Boltzmann adalah $1,38 \times 10^{-23}$ J/k.

Penyelesaian

Tekanan awal gas adalah $P_0 = 2 \text{ atm} = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$.

Tekanan akhir gas adalah $P = 1,9 \text{ atm} = 1,9 \times 10^5 \text{ Pa}$.

Perubahan tekanan gas $P_0 - P = 10^4 \text{ Pa}$.

Suhu percobaan $T = 27^\circ\text{C} = 27 + 273 = 300 \text{ K}$.

Volume ruang yang ditempati gas $V = 0,5 \text{ L} = 0,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
 $= 5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$.

Jumlah molekul yang menempel di permukaan semua partikel adalah

$$\Delta N = N_0 - N = (P_0 - P)V/kT = 10^4 \times (5 \times 10^{-4}) / [(1,38 \times 10^{-23}) \times 300] = 1,2 \times 10^{21} \text{ molekul.}$$

18. Infus

Orang yang kekurangan cairan harus diinfus untuk mengembalikan cairan tubuh. Beberapa obat dimasukkan dalam tubuh melalui infus sehingga bisa segera diserap sel-sel tubuh. Botol infus diletakkan agak tinggi. Dihubungkan dengan selang dan jarum yang ditusukkan ke dalam pembuluh darah. Dengan demikian, cairan infus bisa langsung masuk ke dalam aliran darah.

Agar cairan infus bisa masuk ke dalam pembuluh darah, maka tekanan yang dimiliki cairan infus harus lebih tinggi daripada tekanan darah. Ini dilakukan dengan meninggikan posisi botol infus (**Gambar 2.43**). Tekanan cairan infus sama dengan tekanan atmosfer ditambah tekanan hidrostatis akibat ketinggian botol infus. Tekanan atmosfer adalah 76 cmHg. Tekanan hidrostatis cairan infus adalah

$$P = \rho_c g h$$

Misalkan massa jenis cairan infus sama dengan massa jenis air maka $P = 1.000 \times 9,8 \times h = 9.800 h$. Jika tekanan tersebut dinyatakan dalam cmHg, maka $P = (9.800/13.600 \times 9.8) h \text{ (cm)} = 0,074 h$, di mana h dalam cm.

Misalkan tinggi botol infus adalah 1 meter = 100 cm. Maka tekanan hidrostatis cairan infus adalah $P = 0,074 \times 100 = 7,4$

cmHg. Dengan demikian, tekanan total cairan infus adalah $76 \text{ cmHg} + 7,4 \text{ cmHg} = 83,4 \text{ cmHg}$.



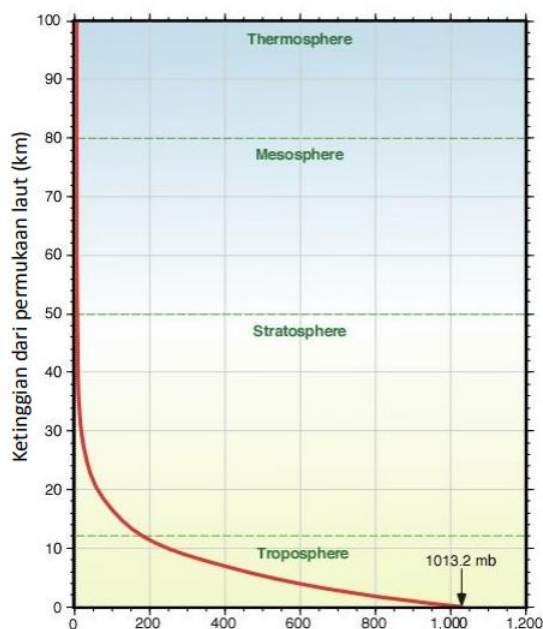
Gambar 2.43. Skema infus (hospital-int.net).

Tekanan darah normal manusia adalah $80 \text{ cmHg} - 120 \text{ cmHg}$. Dengan tekanan cairan infus $83,4 \text{ cmHg}$, maka cairan infus dapat masuk ke dalam darah saat tekanan darah antara 80 cmHg sampai $83,4 \text{ cmHg}$. Saat tekanan darah berada pada nilai antara $83,4 \text{ cmHg}$ sampai 120 cmHg , cairan infus berhenti masuk ke dalam darah. Untuk pasien yang memiliki tekanan darah tinggi posisi botol infus harus lebih tinggi sehingga tekanan total yang dihasilkan lebih tinggi daripada tekanan darah pasien.

19. Tekanan Dalam Kabin Pesawat

Di permukaan laut tekanan udara adalah 1 atm . Satuan lain untuk tekanan udara yang sering digunakan adalah bar yang merupakan singkatan dari barometer. Nilai $1 \text{ bar} = 100.000 \text{ Pa}$. Karena nilai $1 \text{ atm} = 101.320 \text{ Pa}$ maka $1 \text{ atm} = 1,0132 \text{ bar}$. Makin kita naik ke atmosfer maka tekanan udara makin kecil. **Gambar 2.44** adalah kurva perubahan tekanan atmosfer terhadap ketinggian diukur dari permukaan laut.

Yang menarik adalah ketika kita naik pesawat, khususnya pesawat jet. Ketinggian jelajah pesawat jet bisa mencapai 40.000 kaki atau sekitar 12 km dari permukaan laut. Umumnya pesawat jet memiliki ketinggian jelajah di atas 10 km. Kalau kita melihat kurva pada Gambar 2.42, pada ketinggian 10 km di atas permukaan laut tekanan udara hanya sekitar 200 milibar atau setara dengan 0,2 atm. Ini adalah tekanan yang sangat rendah dan manusia bisa segera pingsan dan meninggal pada tekanan tersebut karena kekurangan oksigen. Tetapi bagaimana caranya penumpang pesawat bisa aman selama berjam-jam di dalam penerbangan? Manusia masih bisa nyaman hingga tekanan minimum sekitar 800 milibar. Berada dalam waktu lama di bawah tekanan 800 milibar akan terjadi gangguan pada kesehatan manusia. Tekanan 800 milibar ini kira-kira sama dengan tekanan atmosfer pada ketinggian 2.400 meter dari permukaan laut (lihat kurva di **Gambar 2.44**).



Gambar 2.44. Perubahan tekanan atmosfer terhadap ketinggian. Tekana dinayatakan dalam satuan milibar (1 bar = 1.000 milibar) (physicalgeography.net).

Kabin pesawat adalah ruang yang tertutup (**Gambar 2.45 kiri**). Tidak ada udara yang dapat keluar dan masuk kabin setelah pintu ditutup. Ketika pesawat takeoff maka tekanan kabin mula-mula 1.013,2 milibar. Ketika pesawat makin tinggi maka tekanan dalam kabin diturunkan perlahan-lahan. Hingga pada ketinggian jelajah sekitar 10 km sampai 12 km tekanan di dalam kabin dibuat tetap pada tekanan sekitar 800 milibar. Tekanan dalam kabin pesawat *Boeing 777* sekitar 8,5 Psi atau sekitar setengah atmosfer. Penurunan tekanan perlahan-lahan tersebut tidak dapat dirasakan oleh penumpang. Perubahan tekanan tersebut dikontrol oleh alat yang bernama *pressurization controls*. **Gambar 2.45 (kanan)** adalah *pressurization controls* yang dipasang di pesawat *Boeing-737 Next Generation*. Begitu pula saat pesawat akan mendarat. Tekanan dalam kabin dinaikkan secara perlahan-lahan hingga kembali menjadi tekanan 1 atmosfer ketika pesawat sudah berada di landasan.



Gambar 2.45. (kiri) Kabin pesawat adalah ruang tertutup dan tidak ada udara yang dapat keluar masuk secara bebas (travel.detik.com). Udara dapat keluar dan masuk melalui sistem pengontrolan sehingga tekanan udara dalam kabin dapat dibuat tetap. Saat pesawat menjelajah, tekanan udara dalam kabin jauh lebih tinggi daripada tekanan udara luar. **(kanan)** Pressurization controls yang dipasang di pesawat Boeing-737 Next Generation (en.wikipedia.org). Alat ini yang mengukur tekanan udara dalam kabin dan memerintahkan tambahan supply udara jika tekanan udara dalam kabin sedikit turun

Dalam dunia penerbangan ada istilah ketinggian kabin (cabin altitude). Ketinggian kabin dinyatakan dalam meter. Ketinggian kacil adalah ketinggian atmosfer yang tekanannya sama dengan tekanan dalam kabin pesawat. Sebagai contoh, pada ketinggian 2.400 meter tekanan atmosfer adalah 800 milibar. Jika pesawat menjelah pada ketinggian 12 km dari permukaan laut dan tekanan dalam kabin adalah 800 milibar maka ketinggian kabin adalah 2.400 meter. Dengan kata lain, *Berapapun ketinggian jelajah pesawat, namun jika tekanan dalam kabin adalah 800 milibar maka ketinggian kabin adalah 2.400 meter. Ketinggian kabin tidak bergantung pada ketinggian pesawat, tetapi hanya ditentukan oleh tekanan udara dalam kabin. Jika pesawat memasang tekanan dalam kabin 1 atm maka ketinggian kabin adalah 0, berapapun ketinggian pesawat.*

20. Terusan Panama

Terusan Panama adalah terusan yang melewati negara Panama, Amerika Tengah, yang menghubungkan Samudera Atlantik dan Samudera Pasifik. *Terusan Panama* mempersingkat alur pelayaran antar dua samudera tersebut. Semula kapal laut dari Samudera Pasifik ke Samudera Atlantik, atau sebaliknya harus melewati ujung selatang Benua Amerika yang sangat jauh. Pelayaran tersebut sangat lama dan berbahaya karena sudah dekat dengan kutub selatan bumi. *Terusan Panama* mempersingkat pelayaran tersebut dengan menggali terusan di bagian sempit Benua Amerika, yang menghubungkan Samudera Pasifik dengan Laut Karibia. Panjang terusan ini hanya 80 kilometer. Jumlah kapal yang melewati *Terusan Panama* setiap hari di atas 200 kapal. Yang paling banyak melintas adalah kapal *kargo*, kapal *tanker*, dan kapal *tongkang*.

Hal serupa terjadi dengan pembangunan *Terusan Suez* di Mesir yang menghubungkan Laut Merah dan Laut Tengah. Awalnya, kapal-kapal dari Eropa yang akan ke Asia harus melewati ujung selatan Nenua Afrika. Perjalanan tersebut

sangat panjang dan berbahaya juga karena sudah dekat dengan kutub selatan bumi.

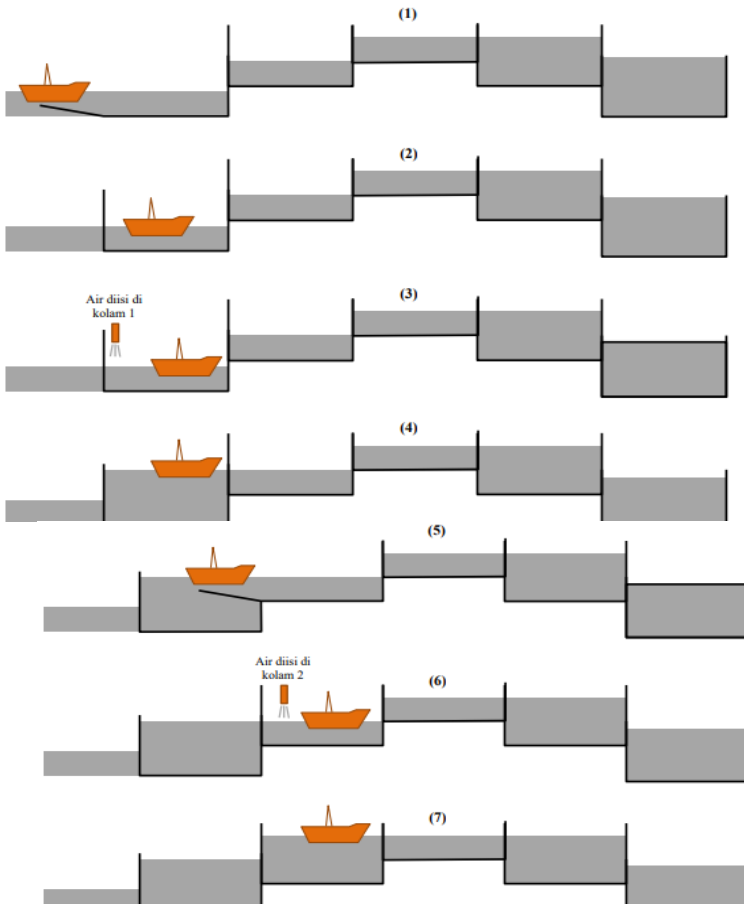
Terusan Panama berbeda dengan *Terusan Suez*. *Terusan Suez* berada di daerah padang pasir sehingga proses penggalian untuk menghubungkan Laut Merah dan Laut Tengah relatif mudah. Setelah selesai dibangun, kapal-kapal melintas dengan mudah seperti melintasi sebuah sungai besar.



Gambar 2.46. Terusan Panama yang terdiori dari kolam-kolam besar. Sebelah kiri tampak kapal sedang melintas terusan Panama (pockets.upperroom.org)

Terusan Panama berada di pegunungan tinggi dan berbatu. Hingga saat ini para ahli belum sanggup membangun semacam sungai yang menghubungkan dua samudera tersebut. Para ahli belum sanggup menggali pegunungan hingga cukup dalam untuk membentuk semacam sungai yang menghubungkan langsung dua samudera. Tetapi **sifat fluida statis** menolong para ahli membuat terusan dalam bentuk kolam-kolam raksasa. *Terusan Panama* dibuat bukan dalam bentuk sungai, tetapi dalam bentuk kolam-kolam raksasa pada ketinggian yang berbeda.

Kolam tersebut dilengkapi dengan pintu-pintu air yang sangat kuat serta pompa pengisian air raksasa (**Gambar 2.46**). Prinsip kerjanya sebagai berikut (**Gambar 2.47**). Misalkan kapal berasal dari Samudera Pasifik menuju Samudera Atlantik.



Gambar 2.47. Skema Pergerakan kapal di Terusan Panama.

Keterangan :

- 1) Kolam pertama memiliki ketinggian permukaan sama dengan ketinggian permukaan Samudera pasifik,
- 2) Kapal masuk ke kolam pertama,
- 3) Pintu kolam pertama ditutup rapat,
- 4) Air diisi ke dalam kolam pertama. Akibat gaya angkat *Archimedes*, dengan naiknya permukaan air di kolam pertama maka posisi kapal juga ikut naik. Air diisi terus di kolam pertama hingga ketinggian

permukaannya sama dengan ketinggian permukaan air di kolam kedua,

- 5) Setelah ketinggian permukaan air kolam pertama dan kedua sama, maka pintu air yang menghubungkan kolam pertama dan kedua dibuka. Setelah itu kapal masuk ke kolam kedua,
- 6) Air kemudian diisi ke kolam kedua hingga ketinggian permukaan air di kolam kedua sama dengan ketinggian permukaan air di kolam ketiga,
- 7) Selanjutnya kapal masuk ke kolam ketiga. Begitu seterusnya hingga kapal masuk ke kolam tertinggi,
- 8) Selanjutnya kapal harus turun menuju ke samudera Atlantik. Kapal harus bergerak dari kolam yang tinggi ke kolam yang rendah. Caranya air dari kolam yang tinggi dikuras sehingga ketinggian permukaannya sama dengan ketinggian permukaan air di kolam berikutnya. Setelah itu kapal bergerak ke kolam berikutnya,
- 9) Begitu seterusnya hingga kapal sampai di samudera Atlantik.

Untuk memindahkan kapal dari Samudera Pasifik ke Laut Karibia atau sebaliknya di *Terusan Panama* dibutuhkan banyak air. Air-air tersebut semuanya akan berakhir melalui pembuangan ke laut. Untuk memindahkan satu kapal diperlukan air sekitar 50 juta galon. Pada tahun 2012 terdapat transit total 14.544 kapal atau secara rata-rata terdapat 40 transit per hari. Dengan demikian konsumsi air per hari untuk memindahkan kapal-kapal tersebut sekitar 2 miliar galon. Sebagai pembandingan, tahun 2005 konsumsi air oleh penduduk kota Panama dan Colon yang berada di sekitar terusan selama sehari hanya 250 juta galon. Dengan demikian, *Terusan Panama* mengonsumsi air sekitar 8 kali lebih banyak daripada konsumsi seluruh penduduk Panama dan Colon.

BAB III

FLUIDA DINAMIS

Fluida dinamis adalah fluida yang mengalir atau bergerak terhadap sekitarnya. Fluida yang dipelajari dalam fluida dinamik dianggap sebagai **fluida ideal**.

Di dalam fluida bergerak, besar tegangan dipengaruhi oleh kecepatan alir dan massa jenis fluida serta ketinggian tempat tersebut.

Ingin Tahu.... Filosofi Fluida Ideal....? Marilah kita perhatikan penjelasan berikut :

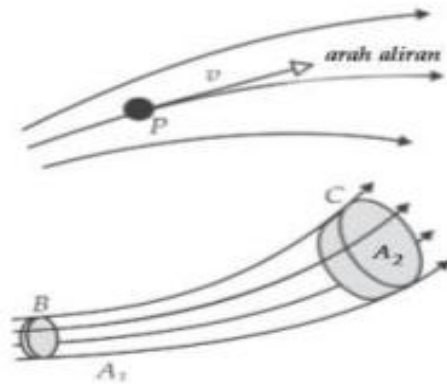
Fluida Ideal adalah :

- *Fluida yang tidak kompresibel*, yang artinya fluida yang tidak mengalami perubahan volume karena tekanan.
- *Fluida yang tidak kental*, yang artinya fluida yang tidak mengalami gesekan dengan pipa (gesekan pipa diabaikan).
- *Aliran fluida stationer*, yang artinya kecepatan, masa jenis, dan tahanan pada setiap detik di dalam fluida tidak dapat berubah karena waktu.

Ciri-ciri umum fluida, adalah sebagai berikut :

- 1) **Aliran fluida dapat merupakan aliran tunak (*steady*) atau tak tunak (*non-steady*)**. Jika kecepatan v di suatu titik adalah konstan terhadap waktu, maka aliran fluida dikatakan *tunak*. Contoh aliran tunak adalah arus air yang mengalir dengan tenang (kelajuan aliran rendah). Pada aliran tak tunak, kecepatan v di suatu titik tidak konstan terhadap waktu. Contoh aliran tak tunak adalah gelombang pasang air laut.

- 2) **Aliran fluida dapat termampatkan (*compressible*) atau tak termampatkan (*incompressible*).** Jika fluida yang mengalir tidak mengalami perubahan volume (atau massa jenis) ketika ditekan, maka aliran fluida dikatakan tak termampatkan. Hampir semua zat cair yang bergerak (mengalir) dianggap sebagai aliran tak termampatkan. Bahkan, gas yang memiliki sifat sangat termampatkan, pada kondisi tertentu dapat mengalami perubahan massa jenis yang dapat diabaikan. Pada kondisi ini aliran gas dianggap sebagai aliran tak termampatkan. Misalnya pada penerbangan dengan kelajuan yang jauh lebih kecil daripada kelajuan bunyi di udara (340 m/s). Gerak relatif udara terhadap sayap-sayap pesawat terbang dapat dianggap sebagai aliran fluida yang tak termampatkan.
- 3) **Aliran fluida dapat merupakan aliran kental (*viscous*) atau tak kental (*nonviscous*).** Kekentalan aliran fluida mirip dengan gesekan permukaan pada gerak benda padat. Pada kasus tertentu, seperti pelumasan pada mesin mobil, kekentalan memegang peranan sangat penting. Akan tetapi, dalam banyak kasus kekentalan dapat diabaikan.
- 4) **Aliran fluida dapat merupakan garis arus (*streamline*) atau aliran turbulen.** Untuk aliran tunak, kecepatan fluida di suatu titik yang sama pada suatu garis arus, misalnya titik P pada **Gambar 3.1**.



Gambar 3.1. Aliran Air Dalam Fluida

Aliran fluida dapat diklasifikasikan dalam beberapa golongan. Fluida yang lebih banyak dibahas adalah air (*incompressible fluids*) dan dibagi menjadi 8 golongan antara lain:

- **Aliran yang tak termampatkan dan termampatkan (*incompressible and compressible flows*).**

Aliran *Tak Termampatkan* adalah kondisi aliran dimana rapat massa fluidanya tidak berubah. Contohnya adalah air, minyak, Aliran *Termampatkan* adalah kondisi aliran dimana rapat massa fluidanya berubah. Contohnya adalah gas. Pada fluida jenis ini berlaku hukum termodinamika.

- **Aliran tunak dan tak tunak (*steady and unsteady flows*)**

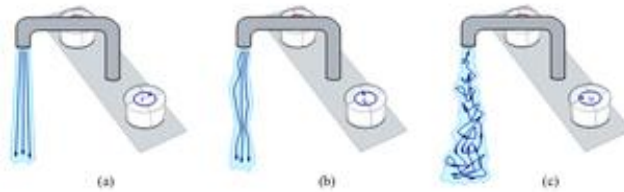
Aliran *tunak* atau aliran *permanen* (*permanent flow*) adalah kondisi dimana komponen aliran tidak berubah terhadap waktu. Contohnya adalah aliran di saluran/sungai pada kondisi tidak ada perubahan aliran (tidak ada hujan, tidak banjir, dll).

- **Aliran seragam dan tak seragam (*uniform and non-uniform flows*)**

Aliran *seragam* adalah kondisi dimana komponen aliran tidak berubah terhadap jarak. Contoh aliran di saluran/sungai pada kondisi tidak ada pengaruh

pembendungan/terjunan, tidak ada penyempitan/ pelebaran yang ekstrim.

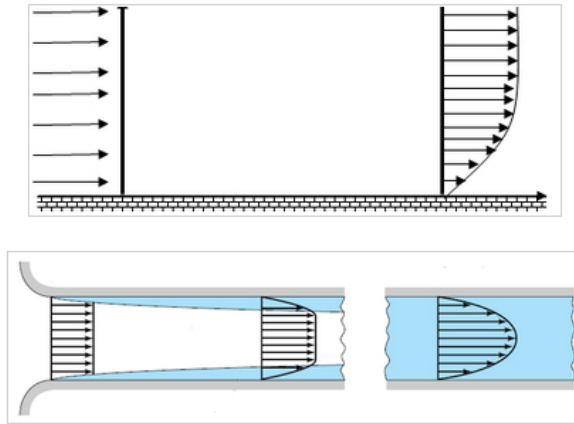
- **Aliran laminar dan turbulen (*laminar and turbulent flows*)**



Gambar 3.2. Fenomena Jenis Aliran

Fenomena aliran jenis ini dapat dijumpai dalam kehidupan sehari-hari, aliran air pada keran mungkin yang paling sering kita jumpai. Gambar di atas menunjukkan, Gambar (a) adalah keran air yang dibuka saat awal (bukan kecil) sehingga air yang mengalir kecepatannya kecil, pada kondisi ini terjadi aliran *laminar*. Kecepatan air meningkat pada Gambar (b) dan Gambar (c) sehingga aliran air berubah menjadi *turbulen*.

Dari sudut pandang *hidraulik*, hal yang paling mudah untuk membedakannya adalah gerak partikel/distribusi kecepatannya seragam, lurus, dan sejajar untuk aliran laminar dan sebaliknya untuk aliran turbulen. Perubahan dari laminar menuju turbulen atau zona transisi terjadi pada jarak tertentu dan zona transisi akan berakhir hingga terjadi kondisi '*fully developed turbulence*'. **Gambar 3.3**, mendeskripsikan perubahan distribusi kecepatan pada saluran terbuka, Gambar (atas) dan saluran tertutup, Gambar (bawah).



Gambar 3.3. Perubahan Distribusi Kecepatan Pada Saluran Terbuka dan Tertutup.

Angka *Reynolds* biasanya digunakan untuk mempermudah dalam membedakan jenis aliran pada klasifikasi ini.

Aliran Terbuka

$Re < 2000$, Aliran Laminer

$Re > 12500$, Aliran Turbulen

Aliran Tertutup

$Re < 500$, Aliran Laminer

$Re < 4000$, Aliran Turbulen

Di antara rentang di atas merupakan kondisi transisi. Pada kondisi aliran laminer, pengaruh viskositas lebih besar daripada inersia dan kondisi sebaliknya untuk aliran turbulen.

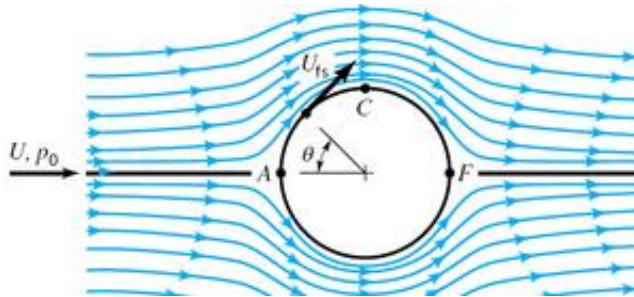
- **Aliran yang dipengaruhi kekentalan dan tidak (*viscous and inviscid flows*)**

Aliran *viscous* atau aliran fluida nyata adalah aliran yang dipengaruhi oleh viskositas. Adanya viskositas menyebabkan adanya tegangan geser dan kehilangan energi.



Gambar 3.4. Percobaan Aliran Viskus

Pada aliran ini, terjadi gesekan antrai fluida dengan dasar/dinding saluran atau pipa. **Gambar 3.4** di atas menampilkan percobaan aliran viskous melalui sebuah pilar berbentuk tabung.



Gambar 3.5. mengilustrasikan aliran invisid melalui sebuah pilar berbentuk tabung

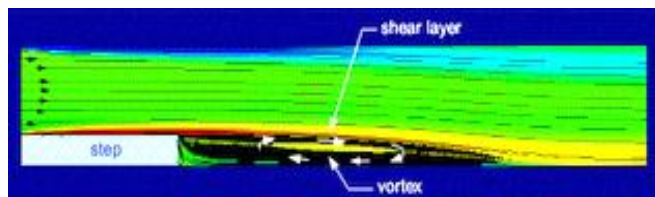
Aliran *invisid* atau aliran *fluida ideal* adalah aliran yang tidak dipengaruhi viskositas/kekentalan, sehingga aliran ini tidak memiliki tegangan geser dan kehilangan energi. Dalam kenyataannya aliran fluida ideal tidak ada. Konsep ini digunakan para peneliti terdahulu untuk membentuk persamaan aliran fluida dan pengaplikasiannya di lapangan ditambahkan faktor penyesuaian sesuai kondisi nyata. **Gambar 3.5.**

di atas mengilustrasikan aliran inviscid melalui sebuah pilar berbentuk tabung

- **Aliran rotasi dan tak rotasi (*rotational and irrotational flows*)**

Aliran *irrotasional* adalah aliran dimana nilai rotasinya atau setiap komponen vektor rotasinya sama dengan nol. Contoh aliran irrotasional adalah medan aliran pada aliran seragam.

Sedangkan aliran *rotasional* adalah aliran dimana nilai rotasinya atau setiap komponen vektor rotasinya tidak sama dengan nol. Hal ini berarti medan aliran dengan kecepatan vektor V atau $\text{curl } V$ tidak sama dengan nol. Contoh dari aliran rotasional ditampilkan pada **Gambar 3.6** di bawah, tampak terjadi pusaran/vortex yang disebabkan ketidakseragaman aliran oleh perubahan penampang akibat terjunan. Namun jauh dari terjunan, aliran masih seragam sehingga aliran irrotasional



Gambar 3.6. Tampak terjadi Pusaran/Vortex yang disebabkan ketidakseragaman aliran oleh perubahan penampang akibat terjunan

- **Aliran subkritis dan superkritis (*subcritical and supercritical flows*)**

Untuk membedakan jenis aliran pada klasifikasi ini sering digunakan angka *Froude*. Angka *Froude* diperoleh melalui persamaan di bawah ini dan merupakan bilangan tak berdimensi.

$$F_r = \frac{U}{\sqrt{g D}}$$

Dimana, U adalah kecepatan rata-rata tampang, g adalah percepatan gravitasi, dan D adalah kedalaman aliran.

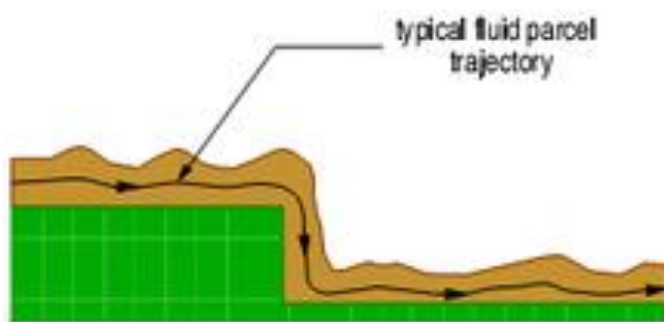
$F < 1$, aliran sub kritis

$F > 1$, aliran super kritis

$F = 1$. Aliran kritis

- **Aliran yang terpisahkan/separasi dan tidak (*separated and unseparated flows*)**

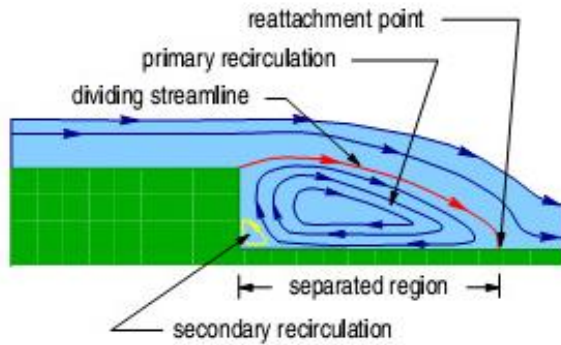
Aliran yang tidak terjadi separasi dapat terjadi pada aliran yang sangat lambat. Penjelasan mengenai fenomena ini ditampilkan melalui sketsa pada **Gambar 3.7**, mengilustrasikan sebuah percobaan sejumlah cairan sirup (viskositas tinggi) dengan suhu rendah yang melampaui *flume* dengan beda tinggi dasar tertentu dengan kecepatan sangat rendah. Saat mencapai pojok *flume*, cairan sirup tetap mengikuti dasar *flume*, turun vertikal dan tetap 'menempel' hingga akhir. Fenomena ini disebabkan momentum yang sangat kecil pada pojok dasar *flume* yang diakibatkan kecepatan yang sangat rendah.



Gambar 3.7. Sketsa Viskositas Tinggi

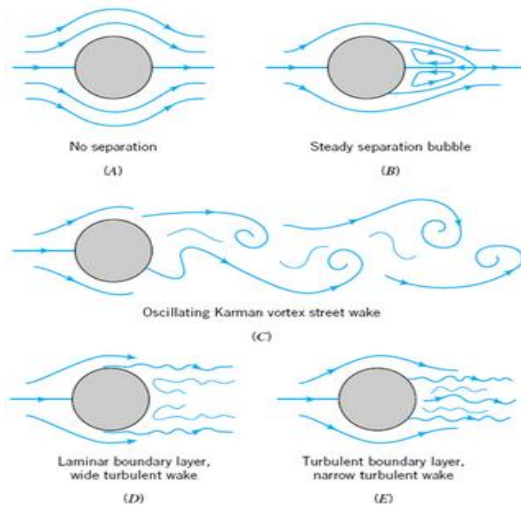
Sedangkan aliran yang terjadi separasi ditampilkan sketsa pada **Gambar 3.8**. Fluida dengan nilai viskositas kecil atau kecepatan tinggi menimbulkan

momentum yang tinggi, sehingga sulit bagi aliran untuk ‘menempel’ pada dasar saluran. Pada **Gambar 3.8** juga mengilustrasikan *aliran rotasional* yang telah dijelaskan sebelumnya



Gambar 3.8. Sketsa Viskositas Kecil

Gambar 3.9, di bawah ini juga mengilustrasikan fenomena aliran pada klasifikasi ini. Pada bagian Gambar (A) dan Gambar (B) juga mengilustrasikan fenomena aliran *viscous* dan *non-viscous* di penjelasan sebelumnya.

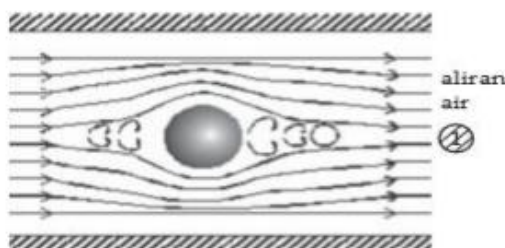


Gambar 3.9. Sketsa Fenomena Aliran Ynag Terpisahkan

1. Definisi Garis Arus

Garis arus adalah aliran fluida yang mengikuti suatu garis (lurus melengkung) yang jelas ujung dan pangkalnya.

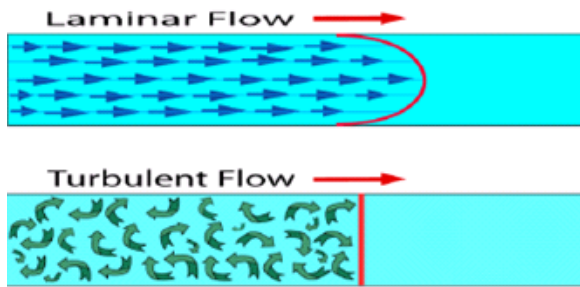
Garis arus disebut juga *aliran berlapis* (*aliran laminar* = *laminar flow*). Kecepatan partikel fluida di tiap titik pada garis arus searah dengan garis singgung di titik tersebut. Dengan demikian, garis arus tidak pernah berpotongan (**Gambar 3.10**)



Gambar 3.10. Pola Aliran Laminer dan Turbulen

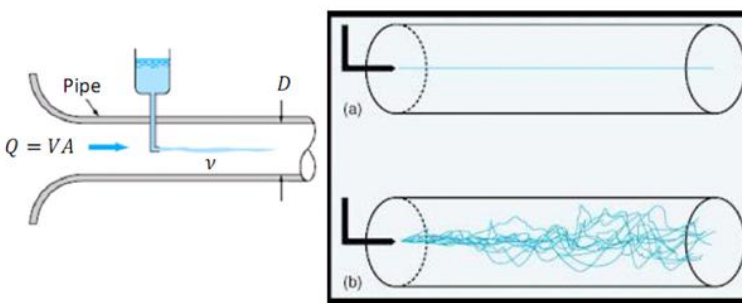
Aliran fluida dapat dibedakan menjadi aliran *laminar* dan aliran *turbulen*, tergantung pada jenis garis alir yang dihasilkan oleh partikel-partikel fluida. Jika aliran dari seluruh partikel fluida bergerak sepanjang garis yang sejajar dengan arah aliran (atau sejajar dengan garis tengah pipa, jika fluida mengalir di dalam pipa), fluida yang seperti ini dikatakan *laminar*. Fluida *laminar* kadang-kadang disebut dengan fluida *viskos* atau fluida *garis alir* (*streamline*). Kata *laminar* berasal dari bahasa latin *lamina*, yang berarti lapisan atau plat tipis. Sehingga, aliran *laminar* berarti *aliran yang berlapis-lapis*. Lapisan-lapisan fluida akan saling bertindihan satu sama lain tanpa bersilangan seperti pada **Gambar 3.11 (atas)**.

Jika gerakan partikel fluida *tidak sejajar*, mulai *saling bersilangan* satu sama lain sehingga terbentuk pusaran di dalam fluida, aliran yang seperti ini disebut dengan aliran *turbulen*, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3.11 (bawah)**.



Gambar 3.11. Aliran Laminar (Atas) Dan Aliran Turbulen (Bawah)

Karakteristik struktur aliran internal (dalam pipa) sangat tergantung dari kecepatan rata-rata aliran dalam pipa, densitas, viskositas dan diameter pipa. Aliran fluida (cairan atau gas) dalam pipa mungkin merupakan aliran laminar atau turbulen. Perbedaan antara aliran laminar dan turbulen secara eksperimen pertama kali dipaparkan oleh *Osborne Reynolds* pada tahun 1883. Eksperimen itu dijalankan dengan menyuntikkan cairan berwarna ke dalam aliran air yang mengalir di dalam tabung kaca. Jika fluida bergerak dengan kecepatan cukup rendah, cairan berwarna akan mengalir di dalam sistem membentuk garis lurus tidak bercampur dengan aliran air, seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 3.12 (a)**.



Gambar 3.12. Percobaan Reynolds Tentang Aliran Laminar (a) dan Aliran Turbulen (b)

Pada kondisi seperti ini, fluida masih mengalir secara laminar. Jadi pada prinsipnya, jika fluida mengalir cukup

rendah seperti kondisi eksperimen ini, maka terdapat garis alir. Bila kecepatan fluida ditingkatkan, maka akan dicapai suatu kecepatan kritis. Fluida mencapai kecepatan kritis dapat ditandai dengan terbentuknya gelombang cairan warna. Artinya garis alir tidak lagi lurus, tetapi mulai bergelombang dan kemudian garis alir menghilang, karena cairan berwarna mulai menyebar secara seragam ke seluruh arah fluida air, seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 3.12 (b)**.

Perilaku ketika fluida mulai bergerak secara acak (tak menentu) dalam bentuk arus-silang dan pusaran, menunjukkan bahwa aliran air tidak lagi laminar. Pada kondisi seperti ini garis alir fluida tidak lagi lurus dan sejajar, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3.12 (b)**.

Menurut *Reynold*, untuk membedakan apakah aliran itu turbulen atau laminar dapat menggunakan bilangan tak berdimensi yang disebut dengan *Bilangan Reynold*. Bilangan ini dihitung dengan persamaan berikut :

$$R_e = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu}$$

Dimana,

R_e = Bilangan Reynold (tak berdimensi)

V = Kecepatan rata-rata (ft/s atau m/s)

D = Diameter pipa (ft atau m)

$\nu = \frac{\rho}{\mu}$ = Viskositas kinematik (m^2/s)

Pada $R_e < 2300$, Aliran bersifat **Laminar**

Pada $R_e > 4000$, Aliran bersifat **Turbulen**

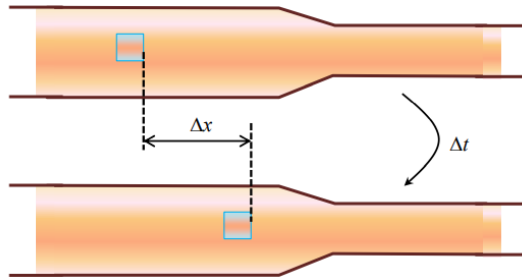
Pada $R_e = 2300 - 4000$, terdapat **daerah transisi**.

2. Laju Aliran Fluida

Setelah mempelajari fluida statis, mari kita perluas pengetahuan kita tentang fluida dengan mempelajari fluida dinamik. Kita akan lihat bahwa persamaan-persamaan Newton yang telah kita pakai pada dinamika partikel dapat diterapkan pula pada fluida.

Salah satu besaran yang penting dalam mempelajari fluida bergerak adalah laju aliran fluida. Laju aliran mengukur

jarak yang ditempuh satu elemen dalam fluida per satuan waktu. Kita akan menentukan persamaan yang berlaku untuk fluida yang mengalir dalam saluran tertutup, baik yang penampangnya selalu tetap atau berubah. *Asumsi* yang digunakan adalah *tidak ada kebocoran selama aliran*.



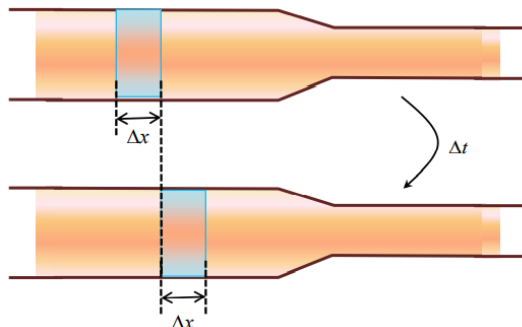
Gambar 3.13. Selama selang waktu Δt , elemen dalam fluida berpindah sejauh Δx .

Perhatikan **Gambar 3.13**. Pada gambar tersebut sebuah elemen fluida berpindah sejauh Δx dalam selang waktu Δt . Laju aliran fluida didefinisikan sebagai

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

3. Debit Aliran

Debit aliran adalah jumlah volum fluida yang mengalir per satuan waktu. Untuk menentukan persamaan debit aliran, mari kita mulai dengan memperhatikan **Gambar 3.14**.



Gambar 3.14. Elemen fluida berupa silinder dengan ketebalan Δx berpindah sejauh Δx selama selang waktu Δt .

Kita lihat irisan fluida tegak lurus penampang pipa yang tebalnya Δx . Anggap luas penampang pipa A . Volume fluida dalam elemen tersebut adalah $\Delta V = A \Delta x$. Elemen tersebut tepat bergeser sejauh Δx selama selang waktu Δt . Jika laju aliran fluida adalah v , maka $\Delta x = v \Delta t$, sehingga elemen volum fluida yang mengalir adalah

$$\Delta V = A \Delta v \Delta t$$

Debit aliran fluida didefinisikan sebagai

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{A \Delta v \Delta t}{\Delta t} = A \Delta v$$

Contoh Soal

Air yang mengalir keluar dari keran ditampung dengan ember. Setelah satu menit ternyata jumlah air yang tertampung adalah 20 L. Jika diameter penampang keran adalah 1 cm, berapakah laju aliran fluida dalam pipa keran?

Penyelesaian

Dalam satu menit, $\Delta t = 1 \text{ menit} = 60 \text{ s}$, jumlah air yang keluar keran adalah $\Delta V = 20 \text{ L} = 20 \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 0,02 \text{ m}^3$.

Dengan demikian, debit aliran air adalah

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{0,02}{60} = 0,00033 \text{ m}^3/\text{s}$$

Jari-jari penampang keran $r = 1/2 = 0,5 \text{ cm} = 5 \times 10^{-3} \text{ m}$.

Luas penampang keran adalah

$$A = \pi r^2 = 3,14 \times (5 \times 10^{-3})^2 = 7,85 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

Laju aliran air dalam keran adalah

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0,00033}{7,85 \times 10^{-5}} = 4,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

4. Persamaan Kontinuitas

Jika pipa yang dialiri fluida tidak bocor sehingga tidak ada fluida yang meninggalkan pipa atau fluida dari luar yang masuk ke dalam pipa sepanjang pipa maka berlaku hukum kekekalan massa. Jumlah massa fluida yang mengalir per satuan waktu pada berbagai penampang pipa selalu sama (**Gambar 3.15**). Akibat hukum kekekalan massa, maka

$$Q_1 = Q_2$$

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \dots \dots \dots (3.1)$$

Persamaan (3.1) disebut juga **Persamaan Kontinuitas**. Berdasarkan persamaan di atas, kita akan dapatkan bahwa pada bagian pipa yang sempit, fluida bergerak dengan kecepatan lebih cepat.



Gambar 3.15. Massa fluida yang mengalir per satuan waktu pada berbagai penampang pipa selalu sama.

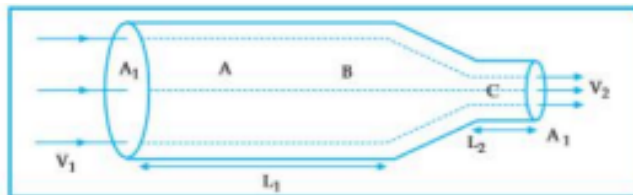
Pada daerah penyempitan sungai aliran air lebih kencang daripada pada daerah yang lebar. Air yang keluar dari keran (tidak menyembur) memperlihatkan perubahan luas penampang yang makin kecil pada posisi yang makin ke bawah (**Gambar 3.16**). Akibat gravitasi, makin ke bawah, laju air makin besar. Agar terpenuhi persamaan kontinuitas, maka makin ke bawah, luas penampang air harus makin kecil.



Gambar 3.16 Air yang mengalir turun dari suatu keran mengalami perubahan luas penampang. Makin ke bawah, penampang air makin kecil.

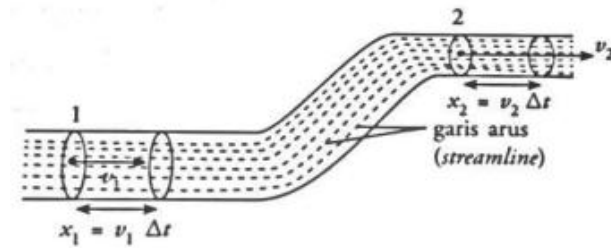
a) **Penurunan Persamaan Kontinuitas**

Jika suatu fluida mengalir dengan aliran *tunak*, massa fluida yang masuk ke salah satu ujung pipa haruslah sama dengan massa fluida yang keluar dari ujung pipa yang lain selama selang waktu yang sama. Hal ini berlaku karena pada aliran *tunak* tidak ada fluida yang dapat meninggalkan pipa melalui dinding-dinding pipa (garis arus tidak dapat saling berpotongan).



Gambar 3.17. Aliran Fluida secara Stationer

Aliran fluida dalam tabung **Gambar 3.17** menggambarkan aliran fluida secara stasioner, sehingga tiap partikel fluida dalam tabung yang melewati titik A akan menempuh lintasan dari partikel yang mendahuluinya yang juga melewati titik A tersebut. Lintasan itu dinamakan garis alir atau garis arus. Misalnya pada gambar tersebut terdapat 3 gambaran garis alir atau garis arus. Jika luas penampang lintang tabung tidak sama, kecepatan partikel fluida itu juga berubah sepanjang garis arusnya. Akan tetapi pada satu titik tertentu dalam tabung, kecepatan setiap partikel fluida itu senantiasa sama. Partikel yang pada suatu saat ada di A kemudian pada saat berikutnya ada di B, bergerak dengan arah dan kecepatan yang berlainan dan akhirnya sampai di C dengan arah dan kecepatan yang lain lagi. Fluida yang mengalir melalui kolom dengan luas penampang A_1 dalam pembuluh sepanjang L_1 , sampai ke kolom dengan luas penampang A_2 berkecepatan V_2 dalam pembuluh sepanjang L_2 , maka berlaku persamaan kontinuitas.



Gambar 3.18. Fluida yang mengalir pada suatu bagian pipa

Tinjau dari fluida yang mengalir dengan aliran tunak dan perhatikan **bagian 1 dan 2 dari pipa (Gambar 3.18)**.
Misalkan:

A_1 dan A_2 adalah luas penampang pipa pada ujung 1 dan 2,

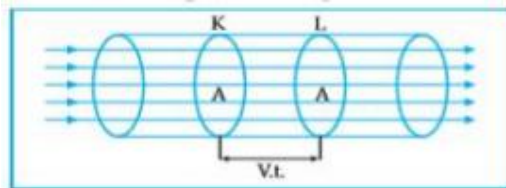
ρ_1 dan ρ_2 adalah massa jenis fluida pada 1 dan 2,

v_1 dan v_2 adalah kecepatan partikel pada 1 dan 2.

Selama selang waktu Δt , fluida pada 1 bergerak ke kanan menempuh jarak $x_1 = v_1 \Delta t$ dan fluida pada 2 bergerak ke kanan menempuh jarak $x_2 = v_2 \Delta t$. Oleh karena itu, volume $V_1 = A_1 x_1$ akan masuk ke pipa pada bagian 1 dan volume $V_2 = A_2 x_2$ akan keluar dari bagian 2. Dengan menyamakan massa fluida yang masuk pada bagian 1 dan yang keluar dari bagian 2 selama selang waktu Δt akan anda peroleh persamaan kontinuitas berikut.

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = A_3 v_3 = \text{konstan}$$

Pada *fluida tak termampatkan*, hasil kali antara kelajuan fluida dan luas penampang selalu *konstan*.



Gambar 3.19. Aliran Fluida melalui Penampang yang Sama

Gambar 3.19 di atas melukiskan suatu fluida yang mengalir melalui suatu pembuluh yang luas penampangnya sama yaitu sebesar A , dengan kecepatan sebesar v . Jika pada suatu saat fluida berada pada penampang K dan setelah t detik kemudian berada di penampang L , maka dalam waktu t tersebut banyaknya fluida yang telah mengalir adalah v , t , A , sehingga persamaan kontinuitas dapat dinyatakan secara matematis : $v \cdot A = \text{konstan}$ atau $v =$ kecepatan aliran (m/s), $A =$ Luas penampang (m^2). Jika pembuluhnya berupa silinder, sehingga penampangnya berbentuk lingkaran, maka: $A = \pi r^2$, sehingga persamaan kontinuitas dapat pula dinyatakan dengan $v_1 r_1^2 = v_2 r_2^2$.

Telah kita ketahui bahwa $A v = Q$ dengan Q adalah debit fluida. Oleh karena itu, persamaan kontinuitas untuk fluida *tak termampatkan* dapat juga dinyatakan sebagai persamaan *debit konstan*, $Q_1 = Q_2 = Q_3 = \text{konstan}$.

b) Perbandingan Kecepatan Fluida dengan Luas Dan Diameter Peampang.

Persamaan Kontinuitas dapat kita ubah menjadi,

$$\begin{aligned} A_1 v_1 &= A_2 v_2 \\ \frac{v_1}{v_2} &= \frac{A_2}{A_1} \dots \dots \dots (3.1) \end{aligned}$$

Kelajuan aliran fluida *tak termampatkan* **berbanding terbalik** dengan *luas penampang* yang dilaluinya.

Pernyataan tersebut menyatakan bahwa jika penampang pipa lebih besar, kelajuan fluida di titik tersebut lebih kecil. Misalnya, jika $A_2 = 4A_1$ maka $v_2 = \frac{1}{4} v_1$.

Umumnya, diameter pipa dapat kita anggap berbentuk lingkaran dengan luas $A = \pi r^2 = \frac{1}{4} \pi D^2$ dengan r adalah jari-jari pipa dan D adalah

diameter pipa. Jika kita substitusikan ke dalam persamaan (3.1), kita peroleh hasil sebagai berikut :

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{A_2}{A_1} \rightarrow \frac{\pi r_2^2}{\pi r_1^2} = \frac{\frac{1}{4} D_2^2}{\frac{1}{4} D_1^2}$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{A_2 r_2^2}{A_1 r_1^2} = \frac{D_2^2}{D_1^2}$$

Kelajuan aliran fluida tak termampatkan berbanding terbalik dengan kuadrat jari-jari penampang atau diameter penampang.

Pernyataan tersebut di atas, menyatakan bahwa jika jari-jari atau diameter pipa dua kali lebih besar, kelajuan fluida di titik tersebut menjadi $(\frac{1}{2})^2 = \frac{1}{4}$ kali lebih kecil.



Gambar 3.20. Semprotan Air

Pada **Gambar 3.20** di atas aplikasi persamaan kontinuitas dalam keseharian. Saat menyemprot taman dengan menggunakan selang, orang tersebut memperkecil luas penampang selang dengan jarinya dan air tersemprot keluar dengan kelajuan yang besar.

Untuk aliran fluida di dalam pipa, kita harus menggambar jarak antar garis arus lebih rapat pada luas penampang yang sempit, karena kecepataannya lebih besar dan menggambar jarak antar garis arus lebih renggang pada luas penampang yang lebar, karena kecepataannya lebih kecil.

c) **Daya oleh Debit Fluida**

Bagaimana kita menghitung daya dari suatu tenaga air terjun yang mengalir dengan debit Q dari ketinggian h (**Gambar 3.21**)? Telah kita ketahui bahwa sejumlah massa air m yang berada pada ketinggian h memiliki energi potensial.



Gambar 3.21. Air terjun yang mengalir dengan debit Q dari ketinggian h akan menghasilkan tenaga dengan daya $\rho Q g h$

$$E_p = m g h$$

Daya P yang dibangkitkan oleh energi potensial tersebut adalah sebagai berikut :

$$P = \frac{E_p}{t} = \frac{m g h}{t} = \frac{(\rho V) g h}{t} \text{ sebab } m = \rho V$$

$$P = \rho \left(\frac{V}{t} \right) g h = \rho Q g h \text{ sebab } \frac{V}{t} = Q$$

$$\mathbf{P = \rho Q g h}$$

d) **Daya Listrik**

Jika air dimanfaatkan untuk membangkitkan listrik dan efisiensi system generator adalah η , persamaannya menjadi seperti berikut,

$$\mathbf{P = \eta \rho Q g h}$$

Contoh Soal

Misalnya air terjun setinggi 40 m dengan debit 50 m³/s dimanfaatkan untuk membuat turbin yang menggerakkan generator listrik. Jika 20% persen energi air dapat diubah menjadi energi listrik ($g = 10 \text{ m/s}^2$), Hitunglah daya listrik yang dibangkitkan generator tersebut !

Penyelesaian

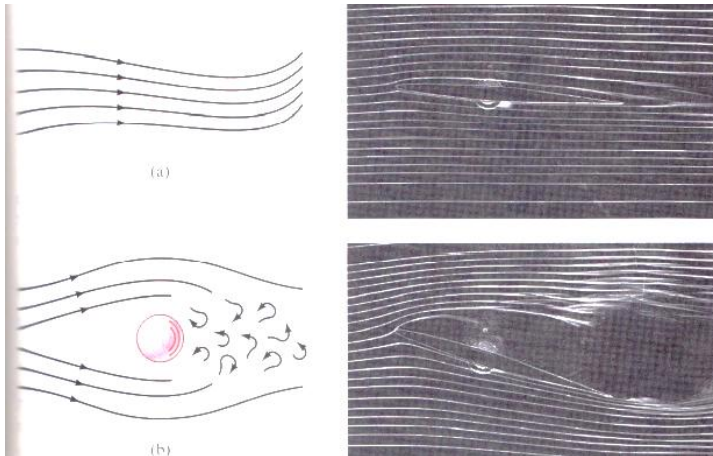
$$P = \eta \rho Q h$$

$$P = (20\%) \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(50 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) (40 \text{ m})$$

$$P = 4.000.000 \text{ W} = 4 \text{ MW}$$

5. Aliran Laminer Dan Turbulen

Kalian pernah mengamati aliran air sungai atau selokan yang cukup kencang bukan? Tampak adanya pusaran-pusaran air. Aliran yang mengandung pusaran-pusaran semacam itu disebut aliran *turbulen*. Membahas fluida yang mengandung aliran turbulen sangat sulit. Untuk itu, kita hanya membahas aliran fluida yang tidak turbulen. Aliran semacam ini disebut aliran *laminer*. **Gambar 3.22** adalah contoh aliran laminar (atas) dan aliran turbulen (bawah).



Gambar 3.22. Aliran Laminer (atas) dan Aliran Turbulen (bawah)

6. Hukum Bernoulli

Salah satu hukum dasar dalam menyelesaikan persoalan fluida bergerak adalah hukum *Bernoulli*. Hukum *Bernoulli* sebenarnya adalah hukum tentang energi mekanik yang diterapkan pada fluida bergerak sehingga keluar persamaan yang bentuknya khas. Sebagaimana lazimnya, untuk menurunkan hukum *Bernoulli*, mari kita amati **Gambar 3.23**.

Coba kita lihat elemen fluida pada lokasi 1,

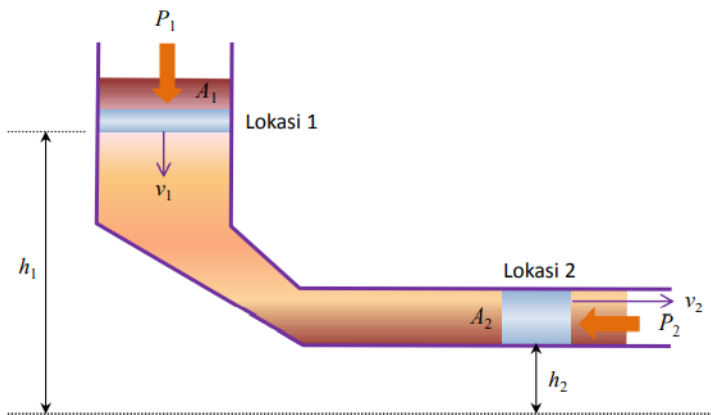
Luas penampang pipa, A_1

Ketebalan elemen pipa, Δx_1

Volum elemen fluida, $\Delta V = A_1 \Delta x_1$

Massa elemen fluida, $\Delta m = \rho \Delta V$

Laju elemen, v_1



Gambar 3.23. Ilustrasi untuk menurunkan hukum Bernoulli

Dengan demikian,

$$\text{Energi Kinetik Elemen, } Ek_1 = \frac{1}{2} \Delta m v_1^2$$

$$\text{Energi Potensial Elemen, } Ep_1 = \Delta m g h = \rho \Delta V g h_1$$

$$\begin{aligned} \text{Energi Mekanik Elemen, } EM_1 &= Ek_1 + Ep_1 \\ &= \frac{1}{2} \rho \Delta V v_1^2 + \rho \Delta V g h_1 \end{aligned}$$

Sekarang mari kita lihat elemen pada lokasi 2:

Luas penampang pipa, A_2

Ketebalan elemen pipa, Δx_2

Volum elemen fluida, $\Delta V = A_2 \Delta x_2$

Massa elemen fluida, $\Delta m = \rho \Delta V$

Laju elemen, v_2

Dengan demikian,

Energi Kinetik Elemen, $E_{k_2} = \frac{1}{2} \Delta m v_2^2$

Energi Potensial Elemen, $E_{p_2} = \Delta m g h = \rho \Delta V g h_2$

Energi Mekanik Elemen,

$$EM_2 = E_{k_2} + E_{p_2} = \frac{1}{2} \rho \Delta V v_2^2 + \rho \Delta V g h_2$$

Elemen pada lokasi 1 dikenai gaya *non konservatif* $F_1 = P_1 A_1$ dan berpindah sejauh Δx_1 searah gaya. Dengan demikian, usaha yang dilakukan gaya tersebut adalah

$$W_1 = F_1 \Delta x_1 = P_1 A_1 \Delta x_1 = P_1 \Delta V$$

Elemen pada lokasi 2 dikenai gaya *non konservatif* $F_2 = P_2 A_2$ dan berpindah sejauh Δx_2 dalam arah berlawanan gaya. Dengan demikian, usaha yang dilakukan gaya tersebut adalah

$$W_2 = -F_2 \Delta x_2 = -P_2 A_2 \Delta x_2 = -P_2 \Delta V$$

Kerja *non konservatif* total yang bekerja pada elemen fluida adalah

$$W = W_1 + W_2 = P_1 \Delta V - P_2 \Delta V = (P_1 - P_2) \Delta V \dots \dots \dots (3.2)$$

Selama bergerak dari lokasi 1 ke lokasi 2, elemen fluida mengalami perubahan energi mekanik,

$$\begin{aligned} \Delta EM &= EM_2 - EM_1 \\ \Delta EM &= \left(\frac{1}{2} \rho \Delta V v_2^2 + \rho \Delta V g h_2 \right) - \left(\frac{1}{2} \rho \Delta V v_1^2 + \rho \Delta V g h_1 \right) \\ &\dots \dots \dots (3.3) \end{aligned}$$

Berdasarkan prinsip kerja energi bentuk ketiga: kerja yang dilakukan gaya *non konservatif* sama dengan perubahan energi

mekanik benda. Dengan menggunakan persamaan (3.2) dan (3.3) kita dapatkan,

$$\begin{aligned}
 W &= \Delta EM \\
 (P_1 - P_2)\Delta V &= \left(\frac{1}{2} \rho \Delta V v_2^2 + \rho \Delta V g h_2 \right) \\
 &\quad - \left(\frac{1}{2} \rho \Delta V v_1^2 + \rho \Delta V g h_1 \right) \\
 P_1 - P_2 &= \left(\frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 \right) - \left(\frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 \right) \\
 P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 &= P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 \dots\dots\dots (3.4)
 \end{aligned}$$

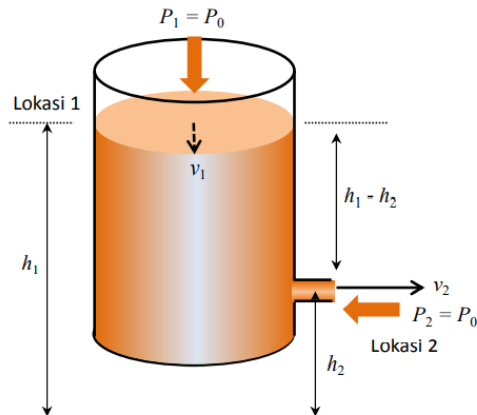
Persamaan (3,4) dikenal dengan **Hukum Bernoulli**. Selanjutnya kita akan membahas sejumlah aplikasi Hukum Bernoulli.

7. Aplikasi Hukum Bernoulli

Hukum Bernoulli yang merupakan persamaan dasar fluida *tidak kompressibel* yang mengalir secara *laminer* telah diterapkan pada berbagai hal. Untuk lebih memahami hukum tersebut mari kita lihat beberapa aplikasinya.

1) Azas Toricelli

Asas Toricelli sebenarnya aplikasi khusus dari *hukum Bernoulli*. Tetapi asas ini ditemukan oleh *Toricelli* satu abad sebelum *hukum Bernoulli* dirumuskan sehingga nama *azas Toricelli* telah umum digunakan.



Gambar 3.24. Menentukan laju keluar air dari suatu keran pada bak penampung yang sangat besar

Perhatikan **Gambar 3.24**, Bak yang penampangnya sangat besar diisi dengan air. Di dasar bak dipasang sebuah keran yang penampangnya jauh lebih kecil daripada penampang bak. Berapa laju aliran air yang keluar dari keran?

Kita terapkan hukum Bernoulli, persamaan (3.4) pada lokasi 1 dan lokasi 2, yaitu pada permukaan air dalam bak dan pada mulut keran.

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2$$

Di lokasi 1 maupun lokasi 2, air didorong oleh tekanan udara luar sebesar 1 atm. Jadi, $P_1 = P_2 = P_0 = 1 \text{ atm}$. Karena luas penampang di lokasi 1 jauh lebih besar dari luas penampang di lokasi 2, maka laju turun permukaan air dalam bak sangat kecil dan dapat dianggap nol. Jadi kita ambil $v_1 \approx 0$. Akhirnya hukum Bernoulli dapat diproksimasi dengan,

$$\begin{aligned} P_0 + 0 + \rho g h_1 &= P_0 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 \\ \frac{1}{2} \rho v_2^2 &= \rho g (h_1 - h_2) \\ v_2 &= \sqrt{2 g (h_1 - h_2)} \quad \dots \dots \dots (3.5) \end{aligned}$$

Persamaan (3.5) dikenal dengan **Azas Toricelli**. Perhatikan dengan seksama persamaan (3.5), laju fluida yang keluar lubang persis sama dengan laju benda jatuh bebas pada ketinggian h_2 ketika dilepas dari ketinggian h_1 .

Contoh Soal

Menara air dengan luas penampang sangat besar memiliki ketinggian 20 m dari posisi keran. Jika diameter lubang keran 1 cm, Hitunglah:

- laju air yang keluar dari keran,
- debit air yang keluar dari keran, dan
- volume air yang keluar dari keran selama 1 menit.

Penyelesaian

Informasi yang diberikan soal adalah $h_1 - h_2 = 20 \text{ m}$,

- Laju aliran air yang keluar dari keran

$$v_2 = \sqrt{2g(h_1 - h_2)} = \sqrt{2 \times 10 \times 20} \\ = 20 \frac{m}{s}$$

- b) Jari-jari lubang keran, $r = \frac{1}{2} \text{ cm} = 5 \times 10^{-3} \text{ m}$

Luas penampang keran, $A_2 = \pi r^2$

$$A_2 = 3,14 \times (5 \cdot 10^{-3})^2$$

$$A_2 = 7,85 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

Debit air yang keluar dari keran,

$$Q = A_2 v_2 = 7,85 \times 10^{-5} \times 20$$

$$= 1,57 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}.$$

- c) Setelah $\Delta t = 1 \text{ menit} = 60 \text{ s}$, volum air yang mengalir keluar dari keran adalah

$$\Delta V = Q \Delta t$$

$$\Delta V = 1,57 \times 10^{-3} \times 60 = 0,942 \text{ m}^3$$

Bagaimanakah...

Jika Penampang Penampung Tidak Terlalu Besar?

Kita telah membahas penampang yang penampangnya sangat besar dibandingkan dengan penampang keran. Bagaimana jika penampang penampung tidak terlalu besar dibandingkan dengan penampang keran? Mari kita kembali ke persamaan **Bernoulli** dengan menggunakan $P_1 = P_2 = P_0 = 1 \text{ atm}$. Kita peroleh,

$$P_0 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_0 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2$$

$$\frac{1}{2} v_1^2 + g h_1 = \frac{1}{2} v_2^2 + g h_2$$

Selanjutnya kita gunakan persamaan *kontinuitas*, $A_1 v_1 = A_2 v_2$,

atau $v_1 = \frac{A_2}{A_1} v_2$, kemudian mengganti v_1 , didapat :

$$\frac{1}{2} \left(\frac{A_2}{A_1} v_2 \right)^2 + g h_1 = \frac{1}{2} v_2^2 + g h_2$$

$$v_2^2 \left(1 - \frac{A_2^2}{A_1^2} \right) = 2g(h_1 - h_2)$$

$$v_2^2 = \frac{2g(h_1 - h_2)}{\left(1 - \frac{A_2^2}{A_1^2} \right)} \dots \dots \dots (3.6)$$

Contoh Soal

Menara air yang tinggi permukaannya 10 meter memiliki luas jari-jari penampang 50 cm.

- Tentukan laju keluarnya air di suatu pipa yang jari-jari penampangnya 8 cm yang berada di dasar menara,
- Tentukan laju turunya permukaan air di bak penampung,
- Berapa jauh turunya permukaan air di bak penampung setelah air mengalir keluar selama 2 detik?

Penyelesaian

Informasi yang diberikan soal adalah $h_1 - h_2 = 10$ m.

$$A_1 = \pi r^2 = 3,14 \times (0,5)^2 = 0,785 \text{ m}^2, \text{ dan}$$

$$A_2 = \pi r^2 = 3,14 \times (0,08)^2 = 0,02 \text{ m}^2$$

- Dengan menggunakan persamaan (3.6), maka laju keluar air di pipa pengeluaran memenuhi,

$$v_2^2 = \frac{2g(h_1 - h_2)}{\left(1 - \frac{A_2^2}{A_1^2}\right)} = \frac{2 \times 10 \times 10}{\left(1 - \frac{(0,02)^2}{(0,785)^2}\right)} = 200,13$$
$$v_2 = \sqrt{200,13} = 14,15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- Dengan menggunakan persamaan kontinuitas, laju turunya permukaan air di bak penampung adalah

$$v_1 = \frac{A_2}{A_1} v_2 = \frac{0,02}{0,785} 14,15 = 0,36 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

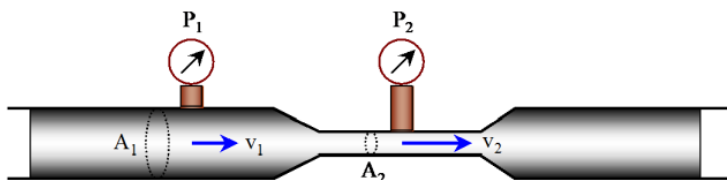
- Jauh turunnya permukaan air di bak penampung setelah 2 s adalah

$$\Delta h = v_1 \Delta t = 0,36 \times 2 = 0,72 \text{ m}$$

2) Venturimeter

Venturimeter adalah alat yang digunakan untuk mengukur laju aliran fluida dalam pipa tertutup. Contohnya mengukur laju aliran minyak pada pipa-pipa penyalur minyak dari tempat pengilangan ke kapal tangker di pelabuhan. Karena minyak yang mengalir dalam pipa tidak dapat dilihat, maka diperlukan teknik khusus untuk mengukur laju alirannya

tersebut. Teknik yang dilakukan adalah memasang pipa yang penampangnya berbeda dengan penampang pipa utama kemudian mengukur tekanan fluida pada pipa utama dan pipa yang dipasang. **Gambar 3.25** adalah contoh skema venturimeter.



Gambar 3.25. Skema pengukuran aliran fluida dengan venturimeter

Kita terapkan hukum *Bernoulli* pada dua lokasi di pipa utama dan pipa yang dipasang,

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2$$

Karena pipa posisinya mendatar, maka kita dapat mengambil $h_1 = h_2$ sehingga,

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \dots \dots \dots (3.7)$$

Selanjutnya kita gunakan persamaan *kontinuitas* $A_1 v_1 = A_2 v_2$, atau $v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1$, sehingga kita peroleh :

$$\begin{aligned} P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 &= P_2 + \frac{1}{2} \rho \left(\frac{A_1}{A_2} v_1 \right)^2 \\ 2 (P_1 - P_2) &= \rho v_1^2 \left(\frac{A_1^2}{A_2^2} - 1 \right) \\ v_1^2 &= \frac{2 (P_1 - P_2)}{\rho \left(\frac{A_1^2}{A_2^2} - 1 \right)} \dots \dots \dots (3.8) \end{aligned}$$

Tampak dari persamaan (3.8), bahwa laju aliran fluida dalam pipa dapat ditentukan hanya dengan mengukur beda tekanan di dua tempat yang memiliki penampang yang berbeda. Pada zaman dulu, beda tekanan diukur berdasarkan ketinggian kolom fluida dalam pipa kecil yang dipasang vertikal. Namun, pada zaman sekarang, teknologi canggih sudah digunakan. Yang digunakan bukan lagi pipa vertikal

tetapi sensor tekanan yang sensitif. Sensor tekanan dipasang pada dua tempat yang dikehendaki. Selisih kekuatan sinyal listrik yang dikeluarkan sensor tersebut sebagai penentu selisih tekanan di dua titik. Sinyal sensor kemudian diproses secara elektronik dan diubah ke bentuk digital, sehingga keluaran akhir adalah laju dalam bentuk display digital.

Contoh Soal

Untuk mengukur perbedaan tekanan pada pipa berpenampang kecil dan besar pada pipa yang dialiri air, digunakan *venturimeter* berbentuk pipa U yang berisi air raksa. Perbandingan luas penampang pipa kecil dan pipa besar adalah 1 : 2. Jika selisih tinggi permukaan air raksa pada pipa-U adalah 5 cm, Berapakah kecepatan fluida pada pipa berpenampang besar dan pipa berpenampang kecil? Berapa pula debit aliran fluida jika jari-jari penampang pipa kecil 5 cm?

Penyelesaian

Diberikan di soal, $\frac{A_2}{A_1} = \frac{1}{2}$ atau $\frac{A_1}{A_2} = 2$. Perbedaan tekanan pada pipa berpenampang besar dan kecil adalah

$$P_1 - P_2 = \rho_{Hg} g h = 1,36 \times 10^4 \times 10 \times 0,05 = 6.800 \text{ Pa}$$

Kecepatan aliran fluida pada pipa berpenampang besar dihitung dengan persamaan (3.8)

$$v_1^2 = \frac{2 (P_1 - P_2)}{\rho_{Air} \left(\frac{A_1^2}{A_2^2} - 1 \right)} = \frac{2 \times 6.800}{1000 (2^2 - 1)} = 4,53$$

$$v_1 = \sqrt{4,553} = 2,1 \frac{m}{s}$$

Dengan menggunakan persamaan *kontinuitas*, maka laju aliran air di pipa berpenampang kecil adalah

$$v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1 = 2 \times 2,1 = 4,2 \frac{m}{s}$$

Luas penampang pipa kecil adalah

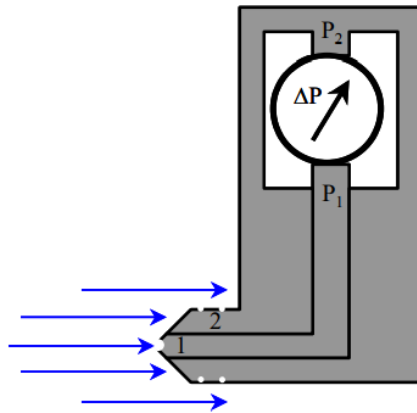
$$A_2 = \pi r^2 = 3,14 \times (0,05)^2 = 0,008 \text{ m}^2$$

Debit aliran air, adalah :

$$Q = A_2 \cdot v_2 = 0,008 \times 4,2 = 0,034 \text{ m}^3/\text{s}.$$

3) Tabung Pitot

Tabung pitot dapat digunakan untuk mengukur laju aliran udara. Tabung ini memiliki dua ujung pipa. Satu ujung pipa (ujung 1) memiliki lubang yang menghadap aliran udara dan ujung yang lain (ujung 2) memiliki lubang yang menyinggung aliran udara. **Gambar 3.26** adalah ilustrasi tabung pitot. Udara yang masuk pada ujung 1 pada akhirnya diam di dalam pipa sedangkan udara pada ujung 2 memiliki laju yang sama dengan laju udara luar. Alat ukur tekanan mengukur beda tekanan udara pada dua ujung pipa. Kita gunakan hukum *Bernoulli* pada ujung 1 dan ujung 2.



Gambar 3.26. Skema Tanung Pitot

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2$$

Kita perhatikan ketinggian ujung 1 dan ujung 2 hampir sama atau $h_1 = h_2$, sehingga :

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

Laju udara di ujung 1 nol dan di ujung 2 sama dengan laju udara luar atau $v_1 = 0$, dan $v_2 = v$, sehingga

$$P_1 + 0 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v^2$$

$$v^2 = \frac{2 (P_1 - P_2)}{\rho} \dots \dots \dots (3.9)$$

Pengukur tekanan mengukur selisih tekanan pada dua ujung pipa, atau $\Delta P = P_1 - P_2$. Berdasarkan beda tekanan tersebut, maka laju aliran udara dapat ditentukan menjadi :

$$v = \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} \dots \dots \dots (3.10)$$

Contoh Soal

Sebuah tabung pitot digunakan untuk mengukur laju aliran udara. Jika saat itu sedang bertiup angin dengan laju 4 m/s, berapakah beda tekanan udara dalam satuan atm yang tdicatat oleh alat ukur?

Penyelesaian

Massa jenis udara $\rho = 1,29 \text{ kg/m}^3$, laju udara: $v = 4 \text{ m/s}$.

Beda tekana udara yang dicatat alat ukur adalah

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho v^2 = \frac{1}{2} \times 1,29 \times 4^2 = 10.32 \text{ Pa}$$

Karena $1 \text{ atm} = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$, maka pembacaan alat ukur dalam satuan atm adalah $\frac{10,32}{(1,013 \times 10^5)} = 10^{-4} \text{ atm}$.

Bagaimana yaah... Penggunaan Tabung Pitot? Tahukah kalian, bahwa **tabung pitot** adalah salah satu instrument utama pada pesawat terbang. Kalau kita lihat di sejumlah *body* pesawat, kita akan amati sejumlah tabung logam yang menonjol dan menghadap ke depan. Itulah **tabung pitot**. **Gambar 3.27** adalah **tabung pitot** yang ada di dua sisi body depan pesawat *Boeing seri 737-800 Next Generation*. Kalau kalian akan naik pesawat, coba perhatikan beberapa bagian *body* pesawat, akan ditemui sejumlah tabung hitam yang menonjol ke depan. Tabung tersebut digunakan untuk **mengukur kecepatan aliran udara terhadap pesawat**, yang artinya *mengukur kecepatan pesawat terhadap bumi*. Memang ddidesain dengan sangat canggih, tetapi prinsip utamanya tetap seperti yang dibahas di atas. **Gambar 3.28** adalah contoh desain **tabung pitot** yang dipasang ke pesawat. Keluaran tabung

tersebut adalah *sinyal-sinyal listrik yang memberikan informasi laju pesawat terhadap udara.*



Gambar 3.27. Tabung pitot pada dua sisi body depan pesawat Boeing seri 737-800 Next Generation. Foto diambil di Bandara Husein Sastranegara, Bandung dan Bandara Syamsuddin Noor, Banjarmasin

Kecelakaan pesawat *Airbus A330-200 Air France* nomor penerbangan 447 tanggal 1 Juni 2009 diduga karena masalah **tabung pitot**. Pesawat dengan rute *Buenos Aires, Argentina ke Paris, Prancis* jatuh di samudera Atlantik dan menewaskan seluruh penumpang yang berjumlah 216 orang dan seluruh kru berjumlah 12 orang. Kesalahan indikator kecepatan akibat **tabung pitot** tertutup kristal es diduga sebagai penyebab awal kecelakaan. Pada suhu puluhan derajat celcius di bawah nol saat pesawat bergerak pada ketinggian di atas 30.000 kaki, mudah sekali terbentuk es pada *body* bagian luar pesawat. Untuk menghilangkan es yang mungkin terbentuk di **tabung pitot**, maka proses pemanasan dilakukan pada tabung. Sebetulnya *airbus* sudah memberikan peringatan adanya masalah pada **tabung pitot** sehingga indikator kecepatan udara tidak memberikan pembacaan yang normal yang menyebabkan *auto-flight* (*auto-pilot, auto-thrust, dan sebagainya*) secara

otomatis tidak berfungsi karena tidak mendapatkan data yang cukup untuk proses pengolahan data penerbangan. Kecelakaan *Air France 447* diduga lebih disebabkan oleh kesalahan pilot karena pilot tidak terlatih dengan baik untuk menangani kondisi kegagalan indikator kecepatan. Dalam kondisi demikian, pilot diduga malah membawa pesawat ke kondisi *stall* (kondisi di mana gaya angkat pada pesawat hilang) sehingga akhirnya menghantam permukaan air laut.



Gambar 3.28. Contoh desain tabung pitot yang dipasang ke pesawat (sumber gambar: aviation.stackexchange.com)

4) Gaya Angkat Bernoulli Pada Pesawat Terbang

Pesawat terbang bisa naik atau turun bukan karena memiliki mesin yang dapat mendorong ke atas atau ke bawah. Mesin pesawat hanya menghasilkan gaya dorong ke arah depan. Tetapi mengapa pesawat bisa naik dan turun? Bahkan pesawat *jet* komersial bisa naik hingga ketinggian di atas 10 km dari permukaan laut. Penyebabnya adalah *struktur pesawat terbang yang dirancang sedemikian rupa sehingga mendapat gaya angkat oleh udara ketika bergerak ke arah depan*. Salah satu sumber gaya angkat adalah *gaya angkat Bernoulli yang terjadi pada sayap*. Tetapi ini bukan satu-satunya gaya angkat pada pesawat.

Untuk memperlihatkan adanya gaya angkat, mari kita terapkan hukum Bernoulli pada titik di sisi atas dan sisi bawah sayap.

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2$$

Kita anggap sayap pesawat tidak terlalu tebal sehingga ketinggian titik di dua sisi pesawat dapat dianggap sama, atau $h_1 \cong h_2$, sehingga

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

Jika luas efektif sayap pesawat adalah A_{ef} , maka gaya ke atas oleh udara di sisi bawah sayap adalah

$$F_1 = P_1 A_{ef}$$

dan gaya ke bawah oleh udara di sisi atas sayap adalah

$$F_2 = P_2 A_{ef}$$

Gaya *netto* ke atas yang dilakukan udara pada sayap pesawat adalah

$$\Delta F = F_1 - F_2 = (P_1 - P_2) A_{ef}$$

Karena,

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 - \frac{1}{2} \rho v_1^2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$$

Disubstitusikan, diperoleh :

$$\Delta F = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) A_{ef} \quad \dots \dots \dots (3.11)$$

Contoh Soal

Pesawat Boeing 777-300ER memiliki massa kosong 168.700 kg. Massa pesawat ditambah muatan untuk terbang yang diizinkan adalah 351.800 kg. Panjang sayap pesawat dari ujung ke ujung (*wingspan*) adalah 64,8 m dengan luas total penampang sayap 436,8 m². Saat lepas landas laju pesawat sekitar 270 km/jam. Misalkan laju udara di sisi atas sayap 25% lebih cepat dari laju di sisi bawah sayap dan misalkan pesawat sedang bergerak pada laju maksimum, berapakah gaya angkat *Bernoulli* pada sayap? Apakah gaya tersebut sanggup mengangkat seluruh berat pesawat? Gunakan massa jenis udara 1 kg/m³.

Penyelesaian

Laju udara di sisi bawah sayap, $v_1 = 270 \text{ km/jam} = 75 \text{ m/s}$

Laju udara di sisi atas sayap, $v_2 = 1,25 v_1 = 1,25 \times 75 = 93,75 \text{ m/s}$

Gaya angkat Bernoulli oleh sayap adalah

$$\Delta F = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) A_{ef}$$

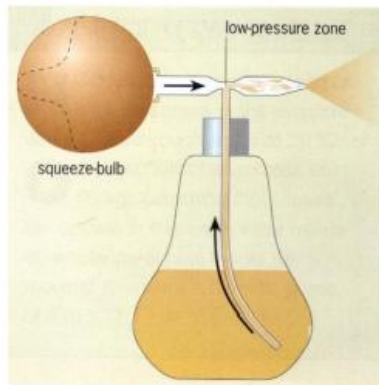
$$\Delta F = \frac{1}{2} \times 1 \times (93,75^2 - 75^2) = 6,91 \text{ N}$$

Berat total pesawat adalah $351.800 \times 9,82 = 3,45 \times 10^6 \text{ N}$. Tampak bahwa **gaya angkat Bernouilli** jauh di bawah bobot pesawat. Jika hanya mengandalkan **gaya angkat Bernouilli**, maka pesawat tidak akan naik.

5) Parfum Spray

Banyak parfum menggunakan cara *spray* untuk menyemprotkan cairan dalam botol ke tubuh. Prinsip yang dilakukan adalah menghasilkan laju udara yang besar di ujung atas selang botol parfum (**Gambar 3.29**). Ujung bawah selang masuk ke dalam cairan parfum. Tekanan udara di permukaan cairan parfum dalam botol sama dengan tekanan atmosfer. Akibat laju udara yang tinggi di ujung atas selang maka tekanan udara di ujung atas selang menurun. Akibatnya, cairan parfum terdesak ke atas sepanjang selang. Dan ketika mencapai ujung atas selang, cairan tersebut dibawa oleh semburan udara sehingga keluar dalam bentuk semburan droplet parfum.

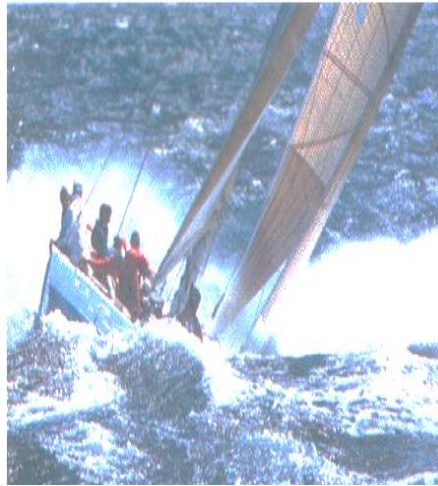
Prinsip serupa kita jumpai pada pengecatan airbrush. Udara yang dihasilkan oleh kompresor dialirkan di ujung atas selang penampung cat sehingga keluar semburan *droplet cat* ke arah permukaan benda yang akan dilukis.



Gambar 3.29. Prinsip Kerja Spray

6) Berlayar Melawan Angin

Perahu layar biasanya bergerak searah angin karena dorongan angin pada layar. Tetapi dengan memanfaatkan hukum *Bernoulli* orang bisa merancang layar perahu sehingga dapat bergerak dalam arah berlawanan dengan arah angin. Perahu semacam ini perlu dua buah layar yang bisa diatur-atur orientasinya (**Gambar 3.30**).

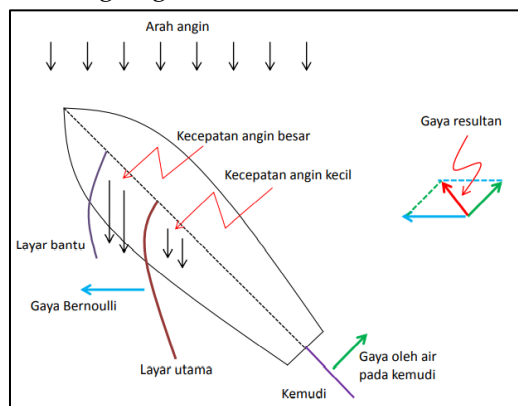


Gambar 3.30. Perahu layar sedang sedang bergerak melawan angin.

Jila kalian lihat lomba layar internasional, tampak bahwa semua perahu memiliki dua layar. Ini dimaksudkan agar perahu tetap dapat bergerak ke arah yang diinginkan, dari manapun arah angin bertiup, sekalipun dari arah depan. Bagaimana menjelaskannya? Perhatikan **Gambar 3.31**.

Untuk menghasilkan gerak berlawanan arah angin, kedua layar diatur sedemikian rupa sehingga angin yang masuk ruang andar dua layar memiliki kecepatan lebih besar. Lengkungan layar mirip dengan lengkungan sisi atas sayap pesawat terbang sehingga kecepatan angin pasa sisi lengkungan layar (di depan layar) lebih besar daripada kecepatan angin di belakang layar. **Gaya Bernoulli** (akibat perbedaan tekanan) mendorong perahu dalam arah tegak lurus arah angin. Nanum, pada saat bersamaan, air laut menarik sirip

perahu dalam arah yang hampir tegak lurus dengan sumbu perahu. Jadi ada dua gaya sekaligus yang bekerja pada perahu, yaitu **gaya Bernoulli** yang bekerja pada layar dan gaya oleh air pada sirip perahu. Diagram kedua gaya tersebut tampak pada **Gambar 3.31**. Resultan ke dua gaya tersebut memiliki arah yang hampir berlawanan dengan arah angin. Dengan demikian, perahu bergerak dalam arah hampir berlawanan dengan arah datang angin



Gambar 3.31. Diagram gaya pada perahu yang sedang berlayar melawan arah angin. Bentuk layar sangat menentukan ke arah mana perahu akan bergerak. Pengaturan bentuk layar yang tepat dapat mengarahkan perahu beralah hampir melawan arah angin

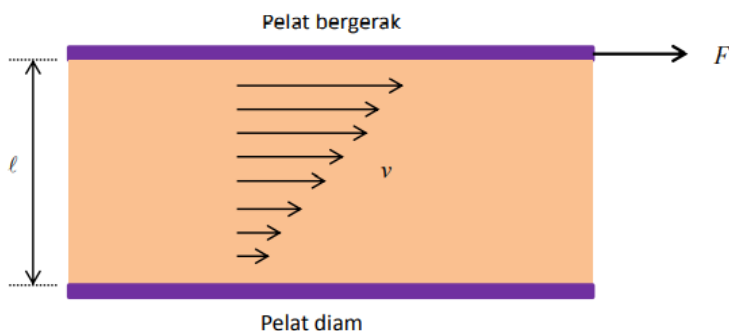
8. Viskositas

Viskositas adalah besaran yang mengukur kekentalan fluida. Hingga saat ini, kita anggap fluida tidak kental. *Persamaan Bernoulli* yang telah kita bahas berlaku untuk fluida yang tidak kental. Namun, sebenarnya, semua fluida memiliki kekentalan, termasuk gas. Untuk memeragakan adanya kekentalan fluida, lihat **Gambar 3.32**. Fluida diletakkan di antara dua pelat sejajar. Satu pelat digerakkan dengan kecepatan konstan v arah sejajar ke dua pelat. Permukaan fluida yang bersentuhan dengan pelat yang diam tetap diam sedangkan yang bersentuhan dengan pelat yang bergerak ikut

bergerak dengan kecepatan v juga. Akibatnya terbentuk gradien kecepatan. Lapisan fluida yang lebih dekat dengan pelat bergerak memiliki kecepatan yang lebih besar. Untuk mempertahankan kecepatan tersebut, diperlukan adanya gaya F yang memenuhi

$$F = \eta A \frac{v}{l}$$

Dengan A luas penampang, l jarak pisah dua pelat, F gaya yang diperlukan untuk mempertahankan pelat tetap bergerak relatif dengan kecepatan v , dan η konstanta yang disebut dengan koefisien viskositas fluida.



Gambar 3.32. Menentukan kekentalan fluida.

Satuan viskositas adalah N s/m^2 . Jika dinyatakan dalam satuan CGS, satuan viskositas adalah **dyne s/cm²**. Satuan ini disebut juga **poise (P)**. Umumnya *koefisien viskositas* dinyatakan dalam **cP (centipoises = 0,001 P)**. Tabel 3.1 adalah koefisien viskositas beberapa jenis fluida.

Tabel 3.1. Koefisien viskositas beberapa jenis fluida

Fluida	Suhu, °C	Koefisien viskositas, η , cPoise
Air	0	1,8
	20	1,0
	100	0,3
Etanol	20	1,2
Oli mesin (SAE 10)	30	200
Gliserin	20	830
Udara	20	0,018
Helium		0,020
Hidrogen	0	0,009
Karbon dioksida		0,015
Xenon	21	0,023
Uap air	100	0,013
Madu		2.000 – 10.000
Benzena		0,604
Gliserol		1.200
Air raksa		1.526

9. Persamaan Poiseuille

Salah satu cara menentukan koefisien viskositas fluida dirumuskan oleh *J. L. Poiseuille* (1799-1869). Satuan *poise* untuk koefisien viskositas diambil dari namanya. Kita dapat menentukan koefisien viskositas fluida dengan mengalirkan fluida tersebut ke dalam pipa dengan luas penampang tertentu. Agar fluida dapat mengalir maka antara dua ujung pipa harus ada perbedaan tekanan. Debit fluida yang mengalir melalui pipa memenuhi *persamaan Poiseuille*,

$$Q = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8 \eta L} \dots \dots \dots (3.12)$$

Dengan Q debit aliran fluida, r jari-jari penampang pipa, L panjang pipa, dan ΔP beda tekanan antara dua ujung pipa.

Untuk mengalirkan minyak dari satu tempat ke tempat lain melalui pipa-pipa, diperlukan pompa yang cukup kuat sehingga terjadi perbedaan tekanan antara dua ujung pipa. Gerakan jantung menyebabkan perbedaan tekanan antara ujung pembuluh darah sehingga darah bisa mengalir. Pompa yang dipasang pada sumber lumpur lapindo sering gagal bekerja karena viskositas lumpur yang sangat besar. Berdasarkan persamaan (3.12) debit aliran berbanding terbalik dengan viskositas. Viskositas lumpur yang sangat besar menyebabkan debit aliran yang sangat kecil meskipun perbedaan tekanan yang dihasilkan pompa cukup besar.

Contoh Soal

Oli mesin SAE 10 mengalir melalui pipa kecil dengan diameter penampang 1,8 mm. Panjang pipa adalah 5,5 cm. Berapakah beda tekanan antara dua ujung pipa agar oli mengalir dengan debit 5,6 mL/menit?

Penyelesaian

Jari-jari penampang pipa $r = 1,8/2 = 0,9 \text{ mm} = 9 \times 10^{-4} \text{ m}$.

Panjang pipa $L = 5,5 \text{ cm} = 5,5 \times 10^{-2} \text{ m}$.

Debit aliran $Q = 5,6 \text{ mL/menit} = 5,6 \times 10^{-6} \text{ m}^3/60 \text{ s} = 9,3 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$.

Berdasarkan **Tabel 3.1**, $\eta = 200 \text{ P} = 200 \times 10^{-3} \text{ Pa.s} = 0,2 \text{ Pa.s}$.

Dengan menggunakan persamaan *Poiseuille* diperoleh

$$\Delta P = \frac{8 \eta L Q}{\pi r^4}$$

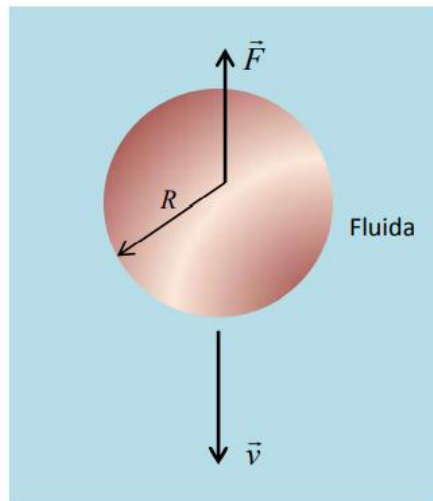
$$\Delta P = \frac{8 \times 0,2 \times (5,5 \times 10^{-2}) \times (9,3 \times 10^{-8})}{3,14 \times (9 \times 10^{-4})^4} = 3973 \text{ Pa}$$

10. Hukum Stokes

Hukum Stokes bisa pula digunakan untuk menentukan koefisien viskositas fluida. Benda yang bergerak dalam fluida mendapat gaya gesekan yang arahnya berlawanan dengan arah gerak benda (**Gambar 3.33**). Besarnya gaya gesekan bergantung pada kecepatan relatif benda terhadap fluida serta bentuk benda. Untuk benda yang berbentuk bola, besarnya gaya gesekan memenuhi **hukum Stokes**,

$$F = 6 \pi \eta r v \dots \dots \dots (3.13)$$

dengan **F** gaya gesekan pada benda oleh fluida, **r** jari-jari bola, dan **v** laju bola relatif terhadap fluida.



Gambar 3.33. Benda yang bergerak dalam fluida mendapat gaya gesekan yang arahnya berlawanan dengan arah kecepatan benda. Khusus untuk benda yang berbentuk bola maka gaya gesekan oleh fluida memenuhi persamaan (3.13)

Jika benda berbentuk bola dijatuhkan dalam fluida maka mula-mula benda bergerak turun dengan kecepatan yang makin besar akibat adanya percepatan gravitasi. Pada suatu saat kecepatan benda tidak berubah lagi. Kecepatan ini

dinamakan *kecepatan terminal*. Gaya yang bekerja pada benda selama bergerak jatuh adalah gaya berat ke bawah, *gaya angkat Archimedes* ke atas, dan **gaya Stokes** yang melawan arah gerak (ke atas juga). Saat tercapat kecepatan terminal, ketiga gaya tersebut seimbang. Berdasarkan kecepatan terminal bola maka kita dapat menentukan viskositas fluida.

Perhatikan **Gambar 3.34**, besarnya gaya berat benda

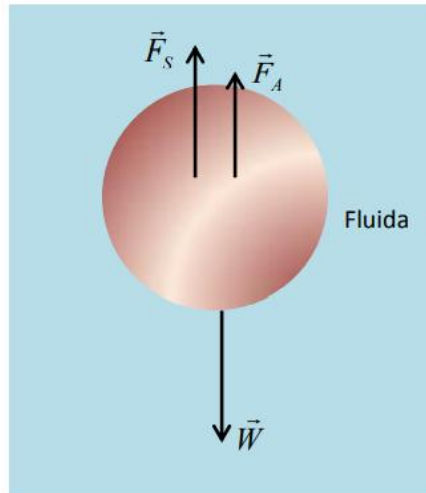
$$W = m g = \rho_b V g = \rho_b \left(\frac{4\pi}{3} r^3 \right) g$$

Besarnya *gaya angkat Archimedes*,

$$F_A = \rho_f V g = \rho_f \left(\frac{4\pi}{3} r^3 \right) g$$

Besarnya *gaya Stokes*,

$$F_S = 6 \pi \eta r v$$



Gambar 3.34. Gaya yang bekerja pada bola yang jatuh ke dalam fluida.

Ketika benda mencapai kecepatan terminal, ke tiga gaya di atas memenuhi persamaan

$$W = F_A + F_S$$

$$\begin{aligned}\rho_b \left(\frac{4\pi}{3} r^3 \right) g &= \rho_f \left(\frac{4\pi}{3} r^3 \right) g + 6 \pi \eta r v \\ \frac{4\pi}{3} r^3 (\rho_b - \rho_f) &= 6 \pi \eta r v \\ \rho_b - \rho_f &= \frac{9 \eta v}{2 r^2} \dots \dots \dots (3.14)\end{aligned}$$

Massa jenis bola, massa jenis fluida, dan jari-jari bola sudah tertentu. Maka dengan mengukur kecepatan terminal, koefisien viskositas fluida dapat dihitung. Jadi kita memiliki dua cara menentukan viskositas fluida. Pertama dengan mengalirkan pada pipa dan menghitung menggunakan *hukum Poiseuille* atau menjatukna bola yang sudah diketahui massa jenis dan dimensinya kemudian mengukur kecepatan terminal bola. Kecepatan terminal akan dicapai jika bola sudah cukup jauh dari lokasi awal dilepaskan dalam fluida.

11. Bilangan Reynolds

Fluida yang mengalir melalui benda atau mengalir dalam pipa bersifat *laminer* jika laju fluida cukup kecil. Jika laju fluida diperbesar maka suatu saat aliran fluida menjadi *turbulen*. Adakah kriteria untuk menentukan apakah aliran fluida bersifat *laminer* atau *turbulen*? Jawabannya ada. Kriteria tersebut diberikan oleh **bilangan Reynolds**. **Bilangan Reynolds** didefinisikan sebagai,

$$R = \frac{\rho v D}{\eta}$$

Dengan, **R** bilangan Reynolds (tidak berdimensi, **ρ** massa jenis fluida, **v** laju aliran fluida, **η** koefisien viskositas, dan **D** dimensi benda yang dilalui fluida atau diameter penampang pipa yang dialiri fluida.

Jika *R* kurang dari 2000, maka aliran fluida adalah *laminer*. Tetapi jika *R* lebih besar dari 5000, maka aliran fluida adalah *turbulen*.

Contoh Soal

Air yang bersuhu 20 °C mengalir dengan laju 1,5 m/s melalui pipa yang memiliki diameter penampang 6 mm. Hitungan **bilangan Reynolds**, dan apakah aliran bersifat laminar atau turbulen?

Penyelesaian

Berdasarkan **Tabel 3.1** koefisien viskositas air pada suhu 20 °C adalah $\eta = 1,0 \times 10^{-3}$ Pa.s. Bilangan Reynolds adalah

$$R = \frac{\rho v D}{\eta} = \frac{10^3 \times 1,5 \times (6 \times 10^{-3})}{1 \times 10^{-3}} = 9000$$

Karena R lebih besar dari 5000 maka aliran air bersifat turbulen.

12. Gesekan Udara

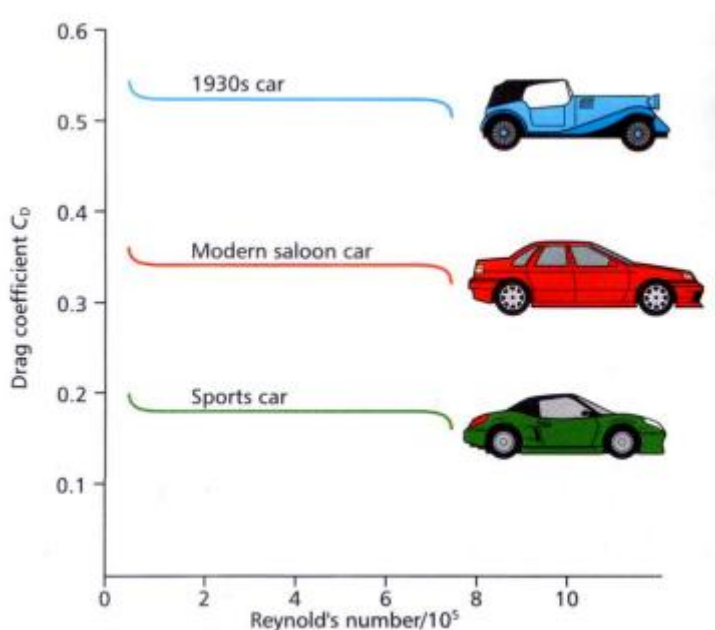
Fenomena gesekan udara pada benda yang bergerak memegang peranan penting dalam perancangan alat-alat transportasi. Adanya gesekan udara menimbulkan pemborosan penggunaan bahan bakar karena sebagian gaya yang dihasilkan oleh mesin kendaraan atau pesawat digunakan untuk melawan gesekan udara. Pabrik yang ingin merancang mobil berkecepatan tinggi, seperti mobil balap harus memperhitungkan benar gesekan udara. Struktur mobil balap dirancang sedemikian rupa sehingga gesekan udara yang dihasilkan sekecil mungkin.

Besarnya gesekan udara pada benda yang bergerak memenuhi persamaan,

$$F = C_D \frac{1}{2} \rho A_p v^2$$

dengan C_D koefisien gesekan, ρ massa jenis udara, v laju relatif benda terhadap udara, dan A_p proyeksi luas benda terhadap arah aliran udara. Koefisien gesekan tergantung pada bentuk permukaan benda. Mobil balap memiliki koefisien

gesekan kecil dibandingkan dengan mobil biasa. **Gambar 3.35** adalah ilustrasi koefisien gesekan pada berbagai jenis kendaraan.



Gambar 3.35. Koefisien gesekan udara pada berbagai jenis kendaraan

Parasut yang digunakan penerjun payung dimaksudkan untuk menghasilkan gesekan udara sehingga kecepatan turun penerjun tidak terlalu besar yang memungkinkan pendaratan dengan selamat. Saat pesawat ulangalik mendarat kembali di bumi, sering kali parasut dilepas dari bagian ekornya untuk menghasilkan gesekan udara sehingga pesawat dapat berhenti dengan segera. Para pembalap sepeda menggunakan helm khusus yang dapat mengurangi gesekan udara sehingga pembalap tidak cepat lelah meskipun memacu sepeda dengan kecepatan tinggi.

Gesakan udara juga berpengaruh pada stabilitas benda yang bergerak, khususnya jika kecepatan benda sangat tinggi. Alat transportasi seperti pesawat terbang dan kereta api

berkecepatan tinggi harus dirancang khusus sehingga gesekan udara ditekan sekecil mungkin dan kestabilannya terjaga akibat adanya gaya yang dihasilkan oleh udara. **Gambar 3.36** adalah bentuk depan salah satu kereta api supercepat di Jepang “shinkansen” yang memungkinkan kereta api tersebut tetap stabil meskipun bergerak dengan kecepatan di atas 300 km/jam.



Gambar 3.36. Rancangan bagian depan kereta supercepat Shinkansen untuk mengurangi gaya gesekan dan meningkatkan kestabilan gerak

13. Topik Khusus

Sekarang kita bahas sejumlah topik khusus yang berkaitan dengan fluida statik maupun dinamik. Sebagian masalah tersebut adalah masalah yang kita alami atau kita tonton sehari-hari. Mudah-mudahan dengan penyajian topik ini kita menjadi sadar bahwa banyak sekali aplikasi fisika dalam kehidupan kita sehari-hari yang dapat mempermudah pekerjaan kita atau memberikan ilmu yang berguna bagi kita agar lebih arif dalam hidup.

Berapa Lama... Air Hujan di Lembang Mencapai Kota Bandung?

Supply air tahan kota Bandung kebanyakan berasal dari gunung di sekelilingnya (Bandung Utara dan Bandung Selatan). Ini akibat ruang terbuka hijau sebagai tempat resapan air di kota Bandung sangat minim. Air hujan di Kota Bandung

semua mengalir di permukaan tanah dan berakhir di sungai Citarum.

Pertanyaan:

Jika hari ini terjadi hujan di pegunungan sekeliling kota Bandung, Berapa lama air tersebut mencapai kota Bandung selama mengalir di dalam tanah?

Debit aliran air dalam tanah memehuni **Hukum Darcy**, yaitu

$$Q = K A \frac{\Delta h}{\Delta L} \dots \dots \dots (3.15)$$

Dengan, A adalah luas penampang yang dialiri, Δh adalah selisih ketinggian dua tempat, ΔL adalah jarak antara dua tempat, dan K adalah konstanta yang dikenal dengan permeabilitas tanah atau material yang dilewati air.

Selisih ketinggian Δh menghasilkan perbedaan tekanan hidrostatik. Perbedaan tekanan inilah yang mendorong air mengalir dalam tanah atau material lainnya. Besaran $\Delta h/\Delta L$ sering disebut **gradien hidrolik**. Untuk tanah yang porinya besar, maka nilai K besar dan air lebih mudah mengalir. Konstanta K juga sering disebut **konduktivitas hidrolik**. Dari persamaan (3.15), maka kita dapatkan laju aliran air dalam tanah sebesar

$$v = \frac{Q}{A} = -K \frac{\Delta h}{\Delta L}$$

Sekarang kita perkirakan waktu yang diperlukan air dari tanah di Lembang mengalir menuju lokasi di kota Bandung. Kita ambil, jarak lurus Lembang Bandung adalah $L = 15 \text{ km} = 15.000 \text{ m}$. Kita ambil perkiraan ketinggian Lembang terhadap kota Bandung 400 m sehingga $\Delta h = - 400 \text{ m}$. Kita asumsikan bahwa tanah antara Lembang dan Bandung mendekati sifat pasir. Berdasarkan data dari *Cherry (1929)* dan *Chathles (1997)*, nilai konduktivitas hidrolik pasir sekitar $K = 10^{-4} \text{ m/s}$. Dengan asumsi bahwa tanah memiliki nilai konduktivitas hidrolik yang sama dengan pasir, maka kita

dapatkan perkiraan laju aliran air tanah antara Lembang-Bandung sekitar :

$$v = -10^{-4} \times \left(\frac{-400}{15.000} \right) = 2,7 \times 10^{-6} \frac{m}{s}$$

Karena jarak bandung Lembang **15 km**, maka waktu yang diperlukan air tanah dari Lembang mencapai Bandung sekitar :

$$t = \frac{15.000}{2,7 \times 10^{-6}} = 5,6 \times 10^9 \text{ s} = 177 \text{ tahun}$$

Mungkin angka tersebut terlampau tinggi. Namun, yang pasti akan butuh waktu puluhan tahun bagi air tanah Lembang mencapai kota Bandung yang jaraknya hanya sekitar 15 km. Pesan yang kita peroleh dari data ini adalah **mari kita pelihara tempat resapan air seperti hutan. Karena butuh waktu 7 puluhan tahun untuk menghasilkan air tanah yang kita minum. Kita bisa menyedot habis air tanah hanya dalam beberapa tahun, tetapi butuh waktu puluhan tahun untuk mengembalikan air tanah tersebut.**

Begitu lambatnya air tanah mengalir. Pantaslah penyedotan air tanah besar-besaran menyebabkan permukaan air tanah turun secara drastis. Penurunan rata-rata air tanah di Bandung **antara 0,5 - 1 meter per tahun**(<http://www.bisnis-jabar.com/index.php/berita/kabar-umum-2711-pasirkaliki-anjlok-30-meter>). Apa yang terjadi dalam 10 atau 20 tahun mendatang jika kondisi tetap seperti sekarang? Mungkin *jet pump* pun tidak sanggup lagi menyedot air tanah. Dari mana orang Bandung mendapatkan air bersih? Begitu pula dengan penduduk kota lainnya.

Ingin Tahu... Cara... Mengukur Massa Jenis Fluida Secara Sederhana

Ketika akan melakukan percobaan pengukuran massa jenis benda, seringkali yang terpikir oleh kita adalah neraca dan gelas ukur. Karena kita selalu ingin menentukan massa jenis sebagai perbandingan massa dan volume. Percobaan ini

mungkin bisa dilakukan di kampus dan sekolah-sekolah dengan fasilitas laboratorium cukup lengkap. Namun untuk sekolah-sekolah di kampung atau di tengah hutan, percobaan seperti itu sulit dilakukan.

Di sini saya jelaskan percobaan sangat sederhana untuk menentukan massa jenis zat cair. Peralatan yang dibutuhkan hanyalah penggaris, gelas yang menyerupai silinder, serta benda kecil yang bentuknya apa saja tetapi terapung di air dan di dalam zat cair yang akan ditentukan massa jenisnya. Massa dan volum benda tidak perlu diketahui. Dengan menggunakan **prinsip Archimedes** maka massa jenis semua zat cair dapat kita tentukan.

Langkah lengkap percobaan sebagai berikut :

- 1) Masukkan air ke dalam gelas yang berbentuk silinder atau menyerupai silinder,
- 2) Beri tanda ketinggian permukaan air,
- 3) Masukkan benda yang terapung ke dalam air. Ukuran benda harus cukup besar sehingga kenaikan air yang dipindahkan dapat diukur secara teliti,

Misalkan ketinggian kenaikan permukaan air adalah h_a . Maka volume air yang dipindahkan adalah

$$V_a = S h_a$$

dengan S adalah luas penampang gelas. Dengan demikian massa air yang dipindahkan menjadi

$$m_a = \rho_a V_a$$

Misalkan massa benda m_b . Dalam keadaan setimbang (benda tidak lagi bergerak naik atau turun) maka gaya ke atas yang dialami benda sama dengan berat benda. Gaya ke atas adalah **gaya Archimedes** yang besarnya sama dengan berat zat cair yang dipindahkan. Jadi dalam keadaan setimbang maka berat benda sama dengan berat air yang dipindahkan, atau massa benda

sama dengan massa air yang dipindahkan. Dengan demikian kita bisa menulis massa benda sebagai

$$\begin{aligned} m_b &= m_a \\ m_b &= \rho_a V_a \\ \mathbf{m_b} &= \mathbf{\rho_a S h_a} \dots \dots \dots (3.16) \end{aligned}$$

- 4) Kemudian buang air dari gelas,
- 5) Isi gelas dengan sirop yang akan diukur massa jenisnya. Tandai posisi permukaan sirop,
- 6) Masukkan benda yang sama ke dalam sirop dan tandai posisi permukaan sirop setelah dicapai kesetimbangan

Misalkan ketinggian naiknya permukaan sirop adalah h_s maka volume sirop yang dipindahkan adalah

$$V_s = S h_s$$

Atau massa sirop yang dipindahkan adalah

$$m_s = \rho_s V_s$$

Ketika benda sudah mencapai kesetimbangan maka gaya angkat Archimedes oleh sirop persis sama dengan berat benda. Akibatnya massa sirop yang dipindahkan persis sama dengan massa benda, yang menghasilkan

$$\begin{aligned} m_b &= m_s \\ m_b &= \rho_s V_s \\ \mathbf{m_b} &= \mathbf{\rho_s S h_s} \dots \dots \dots (3.17) \end{aligned}$$

Dari persamaan (3.16) dan (3.17) kita dapatkan,

$$\rho_s S h_s = \rho_a S h_a$$

Yang memberikan nilai massa jenis sirop adalah

$$\rho_s = \frac{h_a}{h_s} \rho_a \dots \dots \dots (3.18)$$

Persamaan (3.18) sangat luar biasa. Dengan metode ini maka massa jenis fluida dapat diukur hanya dengan mengukur ketinggian naiknya permukaan fluida di dalam gelas. Yang

dilakukan adalah mengukur kenaikan permukaan air sekali saja untuk benda yang sama. Lalu untuk mengukur massa jenis fluida lain kita cukup menentukan ketinggian kenaikan permukaan fluida tersebut ketika memasukkan benda yang sama. Massa jenis air sudah diketahui, yaitu 1000 kg/m^3 . Dengan persamaan (3.18) yang sangat sederhana maka massa jenis berbagai fluida dapat ditentukan.

Sebagai satu pekerjaan rumah, coba kalian tentukan massa jenis sirup yang biasa kalian beli di supermarket. Kalian hanya perlu mencari gelas transparan yang bentuknya mirip silinder. Gelas tersebut ada di jual di supermarket.

Emang ada... Gesekan Udara Pada Bola Golf?

Tahun 1949, *Davies* mengkaji gaya angkat dan gaya gesekan udara pada bola golf yang berputar [*J.M. Davies, Journal of Applied Physics* 20, 821 (1949)]. *Davies* melakukan percobaan pada terowongan angin *B.F. Goodrich* yang memancarkan udara dengan laju 105 ft/s . Kecepatan rotasi bola golf divariasikan hingga 8000 rpm . *Davies* mengamati bahwa gaya gesekan naik secara linier dari sekitar **0,06 lb** untuk bola yang tidak berputar hingga **0,1 lb** untuk bola yang berputar dengan laju **8000 rpm**. Diamati juga adanya gaya angkat yang memenuhi persamaan

$$L = 0,064 [1 - \exp(-0,00026N)]$$

dengan **L** dalam **lb** dan **N** dalam **rpm**.

Tahun 1959, *William* mengamati gaya angkat pada bola golf sebagai fungsi laju [*D. Williams, Quart. J. Mech. Appl. Math.* XII, 387-392 (1959)]. Divariasikan laju penembakan awal **150 - 225 ft/s**. Dengan menggunakan persamaan gaya gesekan yang memenuhi bentuk umum

$$f = C_D A \left(\frac{1}{2} \rho V \right)$$

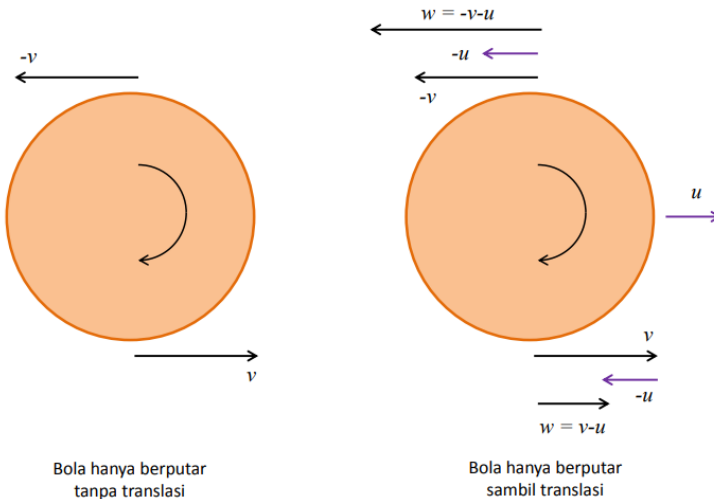
Willimas mendapatkan bahwa C_D berbanding terbalik dengan laju menurut persamaan

$$C_D = \frac{46}{v}$$

dengan v dalam ft/s. Gaya angkat sebesar

$$L = C_L A \left(\frac{1}{2} \rho V \right)$$

muncul, karena perbedaan tekanan akibat putaran bola. Putaran ke belakang bola menyebabkan laju udara di atas bola lebih besar daripada laju udara di bawah bola (Gambar 3.37).



Gambar 3.37. Bola mengalami gaya angkat karena terjadi rotasi.

Jika bola hanya berotasi dan tanpa translasi maka laju udara di atas dan di bawah bola relatif terhadap permukaan bola sama besar. Yang berbeda adalah arah. Karena laju udara sama besar maka tidak ada perbedaan **tekanan Bernoulli** pada permukaan atas dan bawah bola sehingga tidak terjadi gaya angkat.

Jika bola berputar sambil translasi seperti pada **Gambar 3.37**, maka laju udara di sisi bawah dan sisi atas bola terhadap permukaan bola tidak sama besar. Laju udara di sisi bawah menjadi $v - u$ sedangkan laju udara di sisi atas adalah $v + u$, dengan v adalah laju tangensial rotasi permukaan bola dan u adalah laju translasi bola. Laju udara di sisi bawah lebih kecil

daripada di sisi atas. Akibatanya muncul **gaya angkat Bernoulli** ke arah atas.

Penulis dalam Menjalankan *Amar Ma'ruf dan Nahi Mungkar*.... Berpesan :

Marilah kita semua sebagai Hamba Allah...

Senantiasa Memelihara Sholat Fardhu...

Dengan Sholat Fardhu di Awal Waktu Sholat.

Dan Memakmurkan Waktu di Akhir Malam Dengan Sholat Tahhajjud.

LATIHAN SOAL

- 1) Batas kedalaman yang aman bagi seorang penyelam adalah 150 meter. Berapa intensitas tekanan pada kedalaman tersebut dalam air tawar dan air laut ($\text{SG air laut} = 1.025$).
- 2) Air dan alkohol masing-masing dengan volum 200 mL dan 400 mL dicampur. Jika dianggap tidak ada perubahan volum selama pencampuran, berapa massa jenis rata-rata hasil pencampuran?
- 3) Kapal pesiar Oasis of the Seas memiliki panjang 400 meter dan lebar 68 meter (**Gambar 2.7**). Bagian dasar kapal berada pada kedalaman 10,6 meter dari permukaan laut. Perkirakan gaya yang dialami kapal akibat tekanan hidrostatik air laut dengan asumsi massa jenis air laut kira-kira sama dengan massa air, yaitu 1.000 kg/m^3 .
- 4) Pencarian penumpang pesawat yang jatuh di laut Jawa mengharuskan tim SAR menyelam ke dasar laut hingga kedalaman 49 meter. Jika diasumsikan massa jenis air laut sama dengan massa jenis air biasa (1.000 kg/m^3), berapa tekanan total yang dialami penyelam ketika mencapai dasar laut tersebut.
- 5) Pada pompa air ada data yang dinamakan *discharge head*. *Discharge head* artinya adalah ketinggian maksimum air yang dapat didorong pompa. Setiap pompa air, disamping memiliki kemampuan menyedot air (*suction head*) juga memiliki kemampuan mendorong air (*discharge head*). Jika sebuah pompa memiliki *discharge head* 62 meter, Berapakah tekanan dorong yang dihasilkan pompa? Gunakan data $1 \text{ atm} = 100.000 \text{ Pa}$.

- 6) Di sebuah restoran kalian memesan jus jambu. Massa jenis jus jambu sekitar $1,3 \text{ g/cm}^3$. Kalian minum jus menggunakan sedotan yang panjangnya 45 mm. Berapakah maksimal tekanan udara dalam mulut agar jus dapat naik melalui sedotan hingga ke dalam mulut?
- 7) Air dan sejenis oli yang tidak bercampur dengan air dimasukkan ke dalam bejana berhubungan. Dalam kondisi setimbang, posisi air dan oli tampak pada **Gambar 2.18**. Pengukuran dengan mistar menghasilkan $H = 35 \text{ cm}$ dan $h = 10 \text{ cm}$. Dengan menggunakan massa jenis air 1.000 kg/m^3 , berapakah massa jenis oli?
- 8) Dongkrak hidrolik pada tempat cuci mobil memiliki pipa (piston) pengangkat yang memiliki jari-jari 20 cm. Pipa tersebut didorong oleh sejenis oli. Oli dalam pipa dihubungkan dengan kompresor gas. Gas dari kompresor tersebut yang memberi tambahan tekanan pada oli sehingga dapat menaikkan dan menurunkan kendaraan yang dicuci. Berapakah tekanan gas dalam kompresor agar dapat mengangkat mobil yang memiliki massa 1.000 kg?
- 9) Jika barometer air raksa dibawa ke puncak gunung Tambora yang memiliki ketinggian 3.950 meter dari permukaan laut, berapakah tinggi kolom air raksa dalam barometer? Gunakan massa jenis udara 1 kg/m^3 dan massa jenis air raksa 13.600 kg/m^3 .
- 10) Misalnya masa tubuh kamu adalah 60 kg. Ketika mandi di kolam renang, kamu merasakan tubuh menjadi ringan. Dan memang, jika saat dalam air kamu mengapung di neraca terbaca massa tubuh kamu menjadi ringan. Misalkan skala neraca menunjukkan angka 45. Berapakah gaya angkat Archimedes pada tubuh kamu? Berapa volume tubuh kamu yang tercelup

dalam air saat penimbangan? Gunakan massa jenis air 1.000 kg/m^3 .

- 11) Sebuah benda terapung di danau. Setelah diamati ternyata hanya seperempat bagian benda yang ada di permukaan air sedangkan $1/4$ ada di dalam air. Berdasarkan data tersebut, berapakah massa jenis benda?
- 12) Sebuah bola besi memiliki jari-jari 1600 mm . Di dalam bola besi terdapat rongga yang berbentuk bola juga. Ketika dimasukkan ke dalam air ternyata bola besi tersebut melayang di air. Dari informasi ini, hitung jari-jari rongga dalam bola besi. Massa jenis besi adalah 7.600 kg/m^3 .
- 13) Air yang mengalir keluar dari keran ditampung dengan ember. Setelah satu menit ternyata jumlah air yang tertampung adalah 40 L . Jika diameter penampang keran adalah 1 cm , berapakah laju aliran fluida dalam pipa keran?
- 14) Misalnya air terjun setinggi 80 m dengan debit $75 \text{ m}^3/\text{s}$ dimanfaatkan untuk membuat turbin yang menggerakkan generator listrik. Jika 40% persen energi air dapat diubah menjadi energi listrik ($g = 10 \text{ m/s}^2$), Hitunglah daya listrik yang dibangkitkan generator tersebut !
- 15) Menara air dengan luas penampang sangat besar memiliki ketinggian 40 m dari posisi keran. Jika diameter lubang keran 3 cm , Hitunglah:
 - a) laju air yang keluar dari keran
 - b) debit air yang keluar dari keran, dan
 - c) volume air yang keluar dari keran selama 1 menit
- 16) Menara air yang tinggi permukaannya 20 meter memiliki luas jari-jari penampang 100 cm .

- a) Tentukan laju keluarnya air di suatu pipa yang jari-jari penampangnya 8 cm yang berada di dasar menara,
 - b) Tentukan laju turunya permukaan air di bak penampung,
 - c) Berapa jauh turunya permukaan air di bak penampung setelah air mengalir keluar selama 2 detik?
- 17) Untuk mengukur perbedaan tekanan pada pipa berpenampang kecil dan besar pada pipa yang dialiri air, digunakan *venturimeter* berbentuk pipa U yang berisi air raksa. Perbandingan luas penampang pipa kecil dan pipa besar adalah 1 : 4. Jika selisih tinggi permukaan air raksa pada pipa-U adalah 5 cm, Berapakah kecepatan fluida pada pipa berpenampang besar dan pipa berpenampang kecil? Berapa pula debit aliran fluida jika jari-jari penampang pipa kecil 5 cm?
- 18) Sebuah tabung pipot digunakan untuk mengukur laju aliran udara. Jika saat itu sedang bertiup angin dengan laju 4 m/s, Berapakah beda tekanan udara dalam satuan atm yang tdicatat oleh alat ukur?
- 19) Pesawat Boeing 777-300ER memiliki massa kosong 188.700 kg. Massa pesawat ditambah muatan untuk terbang yang diizinkan adalah 351.800 kg. Panjang sayap pesawat dari ujung ke ujung (*wingspan*) adalah 84,8 m dengan luas total penampang sayap 636,8 m². Saat lepas landas laju pesawat sekitar 540 km/jam. Misalkan laju udara di sisi atas sayap 25% lebih cepat dari laju di sisi bawah sayap dan misalkan pesawat sedang bergerak pada laju maksimum, berapakah gaya angkat *Bernoulli* pada sayap? Apakah gaya tersebut sanggup menangkap seluruh berat pesawat? Gunakan massa jenis udara 1 kg/m³.
- 20) Oli mesin SAE 10 mengalir melalui pipa kecil dengan diameter penampang 3,6 mm. Panjang pipa adalah 9,5

cm. Berapakah beda tekanan antara dua ujung pipa agar oli mengalir dengan debit 8,6 mL/menit?

- 21) Air yang bersuhu 40 °C mengalir dengan laju 3,5 m/s melalui pipa yang memiliki diameter penampang 8 mm. Hitungan **bilangan Reynolds**, dan apakah aliran bersifat laminar atau turbulen?

DAFTAR PUSTAKA

- Andi Suryanto dan Syamsul Bakhri*, Buku Fisika 1, Penerbit Insan Cendekia Mandiri (Group Penerbitan CV Insan Cendekia Mandiri), Tahun 2021.
- Andi Suryanto dan Syamsul Bakhri*, Buku Listrik Dan Medan Magnet, Penerbit WADE Group, Tahun 2022.
- Aunil Ghurri, Ph.D*, Buku Dasar-Dasar Mekanika Fluida, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Udayana, Tahun 2014.
- Caramesin*, (<https://caramesin.com/fluida>).
- Dian Ekawati, dkk* , Fluida Dinamis, Program Studi Pendidikan Fisika, Jurusan Pendidikan Matematika Dan IPA, Fakultas Keguruan Dan Ilmu Pendidikan, Universitas Lambang Mangkurat. Tahun 2019.
- Mikrajuddin Abdullah*, Buku Ajar Fisika I Untuk Mahasiswa, Tahun 2016.
- Rudi Prasetya Munawar*, (<http://rudypresetia.blogspot.com>)
- Situs : <https://dafiqur.wordpress.com/2013/04/17/filsafat-alam-mekanika-fluida/>
- Situs : <https://www.fisikaonline.com/2016/01/materi-mekanika-fluida.html>
- Situs : <https://www.merdeka.com/jateng/fungsi-barometer-jenis-dan-cara-kerjanya-perlu-diketahui-kln.html>
- Situs : <https://fluidadinamis.weebly.com/aliran-fluida.htm>

PROFIL PENULIS



Andi Suryanto lahir di Tellongeng Kabupaten Bone, 10 Agustus 1972, menyelesaikan pendidikan S1 di Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknologi Industri Muslim Indonesia Makassar (1992-1998). Bernama lengkap **Dr. Ir. Andi Suryanto, ST, MT, IPM, ASEAN Eng**, melanjutkan pendidikan S2 di Institut Teknologi Sepuluh November (ITS) Surabaya (2002-2004). Pria yang besar dalam keluarga kampung Tellongeng ini, kemudian melanjutkan pendidikan S3 di Institut Teknologi Sepuluh November (ITS) Surabaya dan meraih gelar Doktor dalam bidang Teknologi Proses (2012-2016).

Doktor Teknologi Proses ini dengan *nickname* AS, saat ini selain aktif sebagai Dosen pada mahasiswa S1 di Jurusan Teknik Kimia FTI UMI dan mahasiswa S2 di Program Magister Teknik Kimia Pascasarjana UMI, juga beberapa jabatan yang pernah diamanahkan di Universitas Muslim Indonesia yaitu Penanggungjawab Sistem Mutu Fakultas Teknologi Industri Universitas Muslim Indonesia dan Kepala Laboratorium Operasi Teknik Kimia (2016-2017), Ketua Program Studi Magister Teknik Kimia (2017-2019), Ketua Program Studi Teknik Kimia FTI-UMI (2019-Sekarang). Secara khusus, AS selain mengajar juga aktif dalam kegiatan penelitian terutama pada kajian transformasi fluida dan pengembangan bakar alternatif.



Syamsul Bakhri lahir di Makassar, 5 Desember 1973, menyelesaikan pendidikan S1 di Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri (FTI), Universitas Muslim Indonesia (UMI), Makassar (2005). Bernama lengkap **Ir. Syamsul Bakhri, ST, MT, IPM**, melanjutkan pendidikan S2 di Program Magister Teknik Kimia, Pascasarjana, Universitas

Muslim Indonesia (UMI) Makassar (2016-2018).

Saat ini aktif sebagai Dosen Tetap pada Mahasiswa S1 di Program Studi Teknik Kimia FTI UMI. Secara khusus, pria yang biasa disapa *Bang Syam* ini, spesialis mengajar mata kuliah Matematika (Kalkulus), Fisika Dasar, dan Kimia Dasar bagi Mahasiswa S1 yang masih menempuh tahun pertama di Fakultas Teknologi Industri (FTI) Universitas Muslim Indonesia (UMI) Makassar.

FLUIDA

Mekanisme fluida bagaikan fenomena alam yang menggambarkan aliran benda sesuai sifat dan wujudnya. Semakin kita mempelajari tentang fluida, Insya Allah membawa kita memahami fenomena alam semakin mensyukuri atas nikmat yang diberikan oleh kepada Sang Pencipta seluruh alam, yaitu ALLAH Subhana Wataala.

Buku ini sangat bermanfaat bagi siapa saja yang ingin mengetahui lebih mendalam tentang Fluida, bahkan dapat menjadi pegangan dalam Merancang dan Membangun Instalasi Fluida pada Objek Perumahan, Industridan Obyek Pekerjaan lainnya.